

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БОГАЧЕНКО ЄВГЕН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК: 629.5.03:681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ
ОПЕРАЦІЙ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ СУДЕН

Спеціальність - 271 Морський та внутрішній водний транспорт
Галузь знань - 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів

мають посилання на відповідне джерело



Є. А. Богаченко

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Ворохобін Ігор Ігорович

Одеса - 2025

АНОТАЦІЯ

Богаченко Є. А. Розробка методів оперативної оцінки безпеки операцій динамічного позиціонування суден. - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт, Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2025.

У результаті дисертаційного дослідження вирішено актуальне наукове завдання - розробка методу оперативної динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA) у системах динамічного позиціонування суден.

Сучасні морські операції характеризуються високим рівнем автоматизації, складністю взаємодії технічних та програмних компонентів, а також значною залежністю від рішень оператора системи (DPO). Втрата позиції внаслідок технічної відмови, зовнішніх збурень або людської помилки може призвести до критичних наслідків. У зв'язку з цим зростає потреба в інтелектуальних системах оцінки ризиків у режимі реального часу.

Існуючі підходи до ризик-менеджменту (зокрема PRA, FTA) ґрунтуються на статичних моделях, які не враховують змінність навігаційного контексту, еволюцію стану системи та реакції DPO. Це створює передумови для розробки нової методології - DPRA (Динамічна імовірнісна оцінка ризиків), що дозволяє формувати адаптивні оцінки ризику на основі сенсорних даних, журналів операторських дій, тренажерних сценаріїв і дерев подій.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення рівня безпеки судноплавства шляхом розробки методу оперативної оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування із врахуванням комплексного впливу технічних, організаційних та людських чинників у реальному часі.

Об'єкт дослідження - процес оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування суден.

Предмет дослідження - методи та моделі імовірнісної оцінки ризиків у процесі взаємодії технічних систем і людини в умовах кризових ситуацій динамічного позиціонування суден.

У ході проведеного дослідження було ідентифіковано комплекс ключових факторів, що визначають динаміку розвитку аварійних ситуацій у системах динамічного позиціонування (DP). До таких факторів віднесено: зовнішні збурення (вітрові, хвильові, течійні впливи), втрати або спотворення сигналів позиціонування (насамперед PRS), порушення в електроживленні, а також людський фактор, зокрема затримки або помилки в реакції оператора (DPO). На основі цього аналізу сформовано узагальнену архітектуру сучасної DP-системи, що включає типові джерела вхідної інформації такі як сенсорні блоки, інтерфейс людина-машина (HMI), системи управління тягами, та передбачає наявність динамічної бази знань для накопичення й адаптації сценарного досвіду.

Розроблена структурно-функціональна схема потоків даних дозволила описати взаємодію між компонентами системи у процесі оцінки ризику, а також побудувати формальний опис критичних ситуацій у вигляді математичних моделей: дерева подій (Event Tree), дерева відмов (Fault Tree) та мультигілкових сценаріїв із часовими мітками ключових фаз реагування. У рамках сценарного моделювання впроваджено DPRA-модель (Dynamic Probabilistic Risk Assessment), яка поєднує логіку сценарного аналізу з динамічними байєсовими мережами, що дозволяє моделювати зміну ймовірностей ризику в реальному часі залежно від змін у технічному стані системи, навігаційному контексті та поведінці DPO. Такий підхід забезпечує адаптивність оцінки ризиків і можливість проактивного прогнозування інцидентів.

З метою підвищення точності прогнозування та оптимізації енергоспоживання в умовах реальних зовнішніх впливів, у роботі також

запропоновано застосування параболічного регулятора з нечутливою зоною. Такий підхід забезпечує стійке утримання позиції судна в DP-режимі навіть за дії комбінованих збурень - вітру, хвиль та течій, із одночасним зниженням витрат енергії на стабілізацію. Проведене чисельне моделювання дозволило оцінити вплив відмов у компонентах системи, збоїв у подачі сигналів та дій оператора на поведінку судна в динаміці. Особливу увагу приділено аналізу сценаріїв втрати позиції мобільної бурової установки (MODU) як одного з критичних кейсів.

Для практичної перевірки та калібрування DPRA-моделі створено спеціалізовану тренажерну платформу, що використовує шаблони операторської поведінки, отримані з даних реального або симульованого моніторингу DPO. На її основі також реалізовано функціональну структуру системи підтримки прийняття рішень (DSS), яка здатна формувати контекстно-залежні підказки оператору в межах критичних часових інтервалів, з урахуванням очікуваної реакції людини. Інтерфейс DSS адаптований для сприйняття ймовірнісних оцінок і пропонує варіанти дій із відповідними рівнями ризику.

Проведено верифікацію розробленої DPRA-моделі на основі практичних сценаріїв з тренажерних експериментів і історичних даних. Порівняльний аналіз показав її перевагу над класичними підходами до оцінювання ризику в контексті точності прогнозування, здатності до адаптації в режимі реального часу та сумісності з елементами автономних навігаційних систем.

Загалом результати дослідження мають значний практичний потенціал: вони можуть бути використані для інтеграції моделей DPRA у системи динамічного позиціонування нового покоління, адаптивні DSS-модулі для автономного флоту, тренажерні комплекси з оцінкою поведінки DPO, а також для формування цифрових політик безпеки морських операцій, які здійснюються в режимі реального часу.

Ключові слова: морський транспорт, експлуатація суден, навігаційні системи та прилади, суднові операції, динамічне позиціонування, оцінка ризику, дерева подій, експлуатація обладнання, технічні системи, аналіз надійності, моделювання, система підтримки прийняття рішень, керування рушіями, системи позиціонування, сценарії відмов, мобільна бурова установка, симуляційне навчання, енергоефективність, людино-машинний інтерфейс, адаптивне керування, навігаційні дані, безпека морських операцій, енергетичні установки, збій електроживлення, сценарна діагностика, офшорні операції.

ABSTRACT

Bogachenko E. A. **Development of operational safety assessment methods in dynamic positioning operations of ships.** - Qualification scientific work on the rights of the manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport, National University "Odesa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The dissertation research solved an urgent scientific task: the development of a method for operational dynamic probabilistic risk assessment (DPRA) in dynamic ship positioning systems.

Modern maritime operations are characterized by a high level of automation, complexity of interaction between hardware and software components, and a significant dependence on the system operator's (DPO) decisions. Loss of position due to technical failure, external disturbances, or human error can have critical consequences. In this regard, there is a growing need for intelligent real-time risk assessment systems.

Existing approaches to risk management (e.g. PRA, FTA) are based on static

models that do not consider the variability of the navigation context, the evolution of the system state, and the DPO's response. This creates the prerequisites for the development of a new methodology - DPRA (Dynamic Probabilistic Risk Assessment), which allows for the formation of adaptive risk assessments based on sensor data, operator logs, simulation scenarios, and event trees.

The purpose of the dissertation is to increase the level of safety of navigation by developing a method of operational risk assessment in dynamic positioning systems, taking into account the complex impact of technical, organizational, and human factors in real time.

Object of research: the risk assessment process in dynamic positioning systems of ships.

The study's subject is methods and models of probabilistic risk assessment in the process of interaction between technical systems and humans in crisis situations of dynamic ship positioning.

The study identified a set of key factors that determine the dynamics of emergencies in dynamic positioning systems (DP). These factors include: external disturbances (wind, wave, current influences), loss or distortion of positioning signals (primarily PRS), power supply disruptions, and the human factor, in particular, delays or errors in the operator's response (DPO). Based on this analysis, a generalized architecture of a modern DP system was formed, which includes typical sources of input information such as sensor units, human-machine interface (HMI), and traction control systems, and provides for a dynamic knowledge base for the accumulation and adaptation of scenario experience.

The developed structural and functional diagram of data flows made it possible to describe the interaction between system components in the risk assessment process, as well as to build a formal description of critical situations in the form of mathematical models: Event Tree, Fault Tree, and multi-branch scenarios with timestamps of key response phases. As part of the scenario modeling, the DPRA

model (Dynamic Probabilistic Risk Assessment) was implemented, which combines the logic of scenario analysis with dynamic Bayesian networks, allowing the model to change in risk probabilities in real time depending on changes in the technical condition of the system, navigation context, and DPO behavior. This approach ensures the adaptability of risk assessment and the ability to predict incidents proactively.

To improve forecasting accuracy and optimize energy consumption under real external influences, the paper also proposes using a parabolic controller with an insensitive zone. This approach ensures that the ship's position is steadily maintained in DP mode even under the influence of combined disturbances such as wind, waves, and currents, while reducing energy consumption for stabilization. The numerical modeling made it possible to assess the impact of system component failures, signal failures, and operator actions on the ship's dynamic behavior. Particular attention was paid to analyzing scenarios of loss of position of a mobile drilling unit (MODU) as one of the critical cases.

For practical verification and calibration of the DPRA model, a specialized training platform has been created that uses operator behavior templates obtained from real or simulated DPO monitoring data. It is also the basis for the functional structure of the decision support system (DSS), which can generate context-dependent prompts to the operator within critical time intervals, taking into account the expected human response. The DSS interface is adapted to perceive probabilistic estimates and offers options for action with appropriate levels of risk.

The developed DPRA model was verified based on practical scenarios from simulation experiments and historical data. A comparative analysis showed its superiority over classical approaches to risk assessment in the context of forecasting accuracy, real-time adaptability, and compatibility with elements of autonomous navigation systems.

In general, the study's results have significant practical potential as they can be used to integrate DPRA models into new-generation dynamic positioning systems, adaptive DSS modules for autonomous fleets, training systems with DPO behavior assessment, and digital safety policies for maritime operations carried out in real time.

Keywords: maritime transport, ship operation, navigational systems and instruments, ship operations, dynamic positioning, risk assessment, event trees, equipment performance, technical systems, reliability analysis, modeling, decision support system, propulsion control, positioning systems, failure scenarios, mobile drilling rig, simulation training, energy efficiency, human-machine interface, adaptive control, navigation data, safety of maritime operations, ship engine, power failures, scenario diagnostics, offshore operations.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Богаченко, Є., Ворохобін, І., Бурмака, І., Мельник, О., Онищенко, О. (2024). Системи динамічного позиціонування: Математичне моделювання та алгоритми управління. *Судноводіння*, 36, 20-29. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.20-29>
2. Рябцов, С. В., Богаченко, Є. А., Мельник, О. М., Налева, Г. В., Онищенко, О. А. (2025). Адаптація регуляторів температури головного двигуна для підвищення надійності експлуатації суден у режимі динамічного позиціонування. *Наука і техніка сьогодні*, (4)45, 1532–1551. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1532-1551](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1532-1551)
3. Богаченко, Є., Ворохобін, І. (2025). Використання параболічного регулятора для підвищення маневреності та позиціонування самохідних

бурових платформ. *Судноводіння*, 37, 10-18. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.37.2025.10-18>

Статті у наукових журналах, які індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science:

4. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. D. (2021). Monitoring and identification of DP operators behavioural traits and common errors during simulator training. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(2), 337–341. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.09>

5. Pipchenko, O., Konon, N., & Bogachenko, Y. (2023). Mathematical modelling of "ASD tug - marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations. *Journal of Maritime Research*, 20(2), 117–124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8370780>

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. (2021). Probabilistic risk assessment in dynamic positioning operations. In *Матеріали науково-технічної конференції “Судноводіння, морські перевезення та технології” «Navigation, Shipping and Technology» NST-2021* (18–19 листопада 2021 р., с. 82–85), м. Одеса, Україна.

7. Богаченко, Є. В., Ворохобін, І. І., & Онищенко, О. А. (2025). Концепція створення енергоефективної системи динамічного позиціонування спеціалізованого морського судна. *Науковий семінар «Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок»* (20 січня 2025 р.). Військова академія, м. Одеса, Україна.

8. Богаченко, Є. А. (2025). Ймовірнісна оцінка ризиків у динамічному позиціонуванні морських суден. In *Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції European Congress of Scientific Discovery* (28–30 квітня 2025 р., с. 118–121). Barca Academy Publishing.

9. Bogachenko, Y. A. (2025). Adaptive risk management in offshore dynamic positioning. In *Scientific Achievements of Contemporary Society: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference* (1–3 May 2025, London, UK, pp. 171–173). Cognum Publishing House.

10. Богаченко, Є. (2025). Профілактика та ремонт радіонавігаційних систем як основа безпеки динамічного позиціонування суден. In *Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Modern Science, Economy and Digital Innovation"* (7–9 травня 2025 р., Бухарест, Румунія).

11. Bogachenko, Y. (2020). *DP Concept: Principles of Dynamic Positioning*. Odesa: National University "Odessa Maritime Academy." 154 p. ISBN 978-617-7822-88-1 (монографія).

ЗМІСТ

ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ РИЗИКІВ У СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ	22
1.1 Введення в проблематику динамічного позиціонування і оцінки ризиків.....	22
1.2 Основи динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA).....	33
1.3 Взаємодія оператора, апаратного та програмного забезпечення при оцінці ризиків.....	46
1.4 Методи аналізу людського фактору у DP-системах: CREAM, SPAR-H, ATHEANA.....	55
1.5 Типові проблеми онлайн-оцінки ризиків у DP-системах.....	58
1.6 Формулювання завдань та технологічна карта дослідження.....	61
1.7 Висновки до першого розділу.....	64
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ РИЗИКІВ.....	66
2.1 Структура даних для реалізації динамічної оцінки ризиків (DPRA).....	66
2.2 Дерева відмов у системах динамічного позиціонування.....	71
2.3 Математичне моделювання буксира з азимутальним приводом (ASD) у складі DP-систем.....	76
2.4. Стабілізація курсу, підвищення маневреності та позиціонування самохідних бузових платформ в умовах хвильових збурень.....	92
2.5 Навігаційне моделювання та інтеграція з DPRA.....	102
2.6 Інфраструктура систем DP: керування, сенсори та енергоживлення в контексті DPRA.....	117
2.7 Висновки до другого розділу.....	123

РОЗДІЛ 3. ОПЕРАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ ТА ОЦІНКИ РИЗИКІВ У DP-СЦЕНАРІЯХ.....	125
3.1 Реакції DPO у надзвичайних ситуаціях: типові моделі поведінки та DSS (Decision Support System).....	125
3.2 Тренажерні сценарії та аналіз реакцій DPO в умовах ризику.....	138
3.3 Проблеми та обмеження впровадження онлайн-оцінки ризиків у DP-системах.....	148
3.4 Висновки до третього розділу.....	159
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ DPRA ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	161
4.1 Формалізація причин аварій DP-об'єктів на основі сценарного DPRA-моделювання.....	161
4.2 Моделювання температурних режимів головного двигуна плавучих об'єктів у DP-системах.....	174
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	190
ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	196
ДОДАТОК А.....	229
ДОДАТОК Б.....	231

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ADS** (Automatic Detection System) - Система автоматичного виявлення;
- AHTS** (Anchor Handling Tug Supply) - Буксирне судно для роботи з якорями та постачання;
- ASD** (Azimuth Stern Drive) - Азимутальний кормовий привід;
- ASOG** (Activity Specific Operating Guidelines) - Специфічні операційні інструкції для конкретної активності;
- CREAM** (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) - Метод когнітивного аналізу надійності та помилок;
- DPO** (Dynamic Positioning Operator) - Оператор системи динамічного позиціонування;
- DP** (Dynamic Positioning) - Динамічне позиціонування (ДП);
- DPRA** (Dynamic Probabilistic Risk Assessment) - Динамічна імовірнісна оцінка ризиків;
- DSS** (Decision Support System) - Система підтримки прийняття рішень;
- FTA** (Fault Tree Analysis) - Аналіз дерева відмов;
- GPS** (Global Positioning System) - Глобальна система позиціонування;
- HMI** (Human-Machine Interface) - Людино-машинний інтерфейс;
- IMCA** (International Marine Contractors Association) - Міжнародна асоціація морських підрядників;
- MODU** (Mobile Offshore Drilling Unit) - Пересувна морська бурова установка;
- PRA** (Probabilistic Risk Assessment) - Імовірнісна оцінка ризику;
- PRS** (Position Reference System) - Система позиційної прив'язки;
- SPAR-H** (Standardized Plant Analysis Risk-Human) - Стандартизований аналіз людських помилок у промислових системах;
- UPS** (Uninterruptible Power Supply) - Джерело безперебійного живлення.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному морському судноплавстві системи динамічного позиціонування (DP) відіграють ключову роль у забезпеченні точного утримання суден на позиції без використання якорів. Застосування таких систем є критично важливим під час виконання високоточних операцій біля платформ, наукових спостережень, буріння або рятувальних дій. Водночас зростає технічна складність DP-систем, посилюється залежність від програмного забезпечення та автоматизованого управління, а роль людини (оператора DPO) в екстремальних умовах не втрачає свого значення.

Існуючі методи оцінки ризиків, зокрема PRA (Probabilistic Risk Assessment), мають переважно статичний характер та не враховують реального перебігу подій у часі, зміни умов середовища, поведінкових характеристик оператора й міжкомпонентної взаємодії. Класичні ризик-методики не здатні в режимі реального часу адаптуватися до нових сценаріїв або передбачити потенційні каскадні відмови, які можуть мати катастрофічні наслідки, такі як втрата позиції, зіткнення, пошкодження обладнання, забруднення довкілля.

Актуальність проблеми обумовлюється тим, що в умовах зростаючої інтенсивності морських операцій, автоматизації та переходу до автономного судноплавства, необхідно створювати методи динамічної оцінки ризиків, які:

- враховують часову еволюцію ситуацій;
- базуються на сенсорних даних та поведінковій аналітиці;
- дозволяють адаптувати управлінські рішення до контексту навігації

та технічного стану судна.

Крім того, аналіз практичних інцидентів (на основі даних ІМСА) демонструє, що більшість серйозних відмов DP-систем пов'язані з комбінацією людських помилок, некоректного реагування на збої у системах PRS, відмови енергоживлення та недостатньої автоматизації підтримки рішень.

У цьому контексті виникає потреба в новій інтегрованій методології досліджень, яка органічно поєднує динамічну імовірнісну оцінку ризиків (DPRA), моделювання поведінки судна і оператора та алгоритми підтримки прийняття рішень (DSS) з можливістю практичного впровадження, зокрема, у тренажерну підготовку й морські операції. Розробка таких нових методів дозволить не лише підвищити безпеку морських операцій, але й створить основу для нових стандартів морського ризик-менеджменту в умовах автономізації судноплавства та нових вимог до екологічної відповідальності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Дисертаційне дослідження відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки, визначеним Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема в частині забезпечення надійності, безпеки та ефективності функціонування транспортної інфраструктури, впровадження інформаційних технологій управління складними технічними об'єктами.

Робота узгоджується з положеннями Морської доктрини України на період до 2035 року, яка акцентує увагу на зростанні рівня технічної безпеки морських операцій та впровадженні інноваційних технологій управління суднами, а також із Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року, де визначено завдання забезпечення сталого функціонування морського транспорту шляхом впровадження інформаційних технологій, підвищення безпеки та розвитку людського капіталу.

Практична реалізація результатів дисертаційного дослідження здійснена у межах науково-дослідної тематики, яка виконуються в Національному університеті «Одеська морська академія», зокрема, у науково-дослідній роботі кафедри управління судном ДР № 0123U101463 «Сучасні методи управління та експлуатації суден», у який здобувачем виконано окремий розділ, присвячений системам позиціонування (DP) суден офшорного флоту.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення рівня безпеки судноплавства шляхом розробки методу оперативної оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування із врахуванням комплексного впливу технічних, організаційних та людських чинників у реальному часі.

Задачі дослідження:

1. Розробити методологію динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA), яка дозволяє моделювати часову еволюцію ризику з урахуванням технічних відмов, поведінкових реакцій оператора та змін середовища.

2. Побудувати структури дерев відмов та сценаріїв аварійних подій, що охоплюють як стандартні режими (Drive-off, Drift-off, Blackout), так і специфічні каскадні збої в логіці роботи системи, для подальшого їх використання в DPRA-моделі.

3. Інтегрувати моделі людського фактору (CREAM, SPAR-H, ATHEANA) у вигляді байєсових мереж для оцінки помилок прийняття рішень з урахуванням когнітивного стану оператора, інформаційного навантаження та рівня ситуаційної обізнаності.

4. Розробити математичні моделі керування судном у режимі DP, з використанням параболічних регуляторів з нечутливою зоною, що забезпечують покращену стійкість, енергоефективність та плавність дій у нестабільному середовищі.

5. Здійснити практичну апробацію DPRA на кейсах аварій та симуляціях, порівняти її ефективність із класичними PRA-рішеннями за критеріями адаптивності, точності, часу реагування та енерговитрат та обґрунтувати потенціал інтеграції в автономні морські системи (ASOG).

Об'єкт дослідження - процес оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування суден.

Предмет дослідження - методи та моделі імовірнісної оцінки ризиків у

процесі взаємодії технічних систем і людини в умовах кризових ситуацій динамічного позиціонування суден.

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження виконувалось у відповідності до основних положень загальної теорії систем, системного аналізу, а також методології ризик-орієнтованого судноплавства. Теоретичною основою стали положення теорії надійності, ймовірнісного аналізу безпеки та математичного моделювання складних технічних систем. Чисельні розрахунки, побудова графіків, візуалізація моделей та статистична обробка даних проводилися за допомогою програмного забезпечення MS Excel, Statistica, MATLAB/Simulink та Bayes Net Toolbox для реалізації динамічних байєсових мереж.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано нові результати, які у сукупності вирішують актуальну наукову проблему забезпечення безпеки операцій динамічного позиціонування суден на основі оперативної оцінки ризиків. Основні наукові положення, що характеризують новизну дослідження, полягають у наступному:

вперше:

- запропоновано метод оперативної динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA) для систем динамічного позиціонування суден, який, на відміну від відомих підходів, враховує часову залежність розвитку подій, поєднання технічних відмов, людських помилок і зовнішніх чинників у реальному часі, та забезпечує на практиці можливість автоматизованого прогнозування критичних сценаріїв і оперативного коригування рішень оператора системи при зміні умов середовища;
- розроблено функціонально-орієнтовану архітектуру потоків даних для систем динамічного позиціонування, яка включає навігаційні й технічні параметри, моделює когнітивний стан, дії оператора та час реагування та забезпечують сценарії для калібрування оцінки ризиків, і на відміну від відомих

статичних схем, підтримує динамічну адаптацію ризику до змін навігаційних умов, технічного стану та кваліфікації екіпажу;

удосконалено:

- методи імовірнісної оцінки ризиків (PRA), шляхом розширення їх функціоналу на динамічні події і сценарії з урахуванням часової еволюції ризиків, які на відміну від існуючих здатні оцінювати не тільки ймовірність виходу системи з ладу, а й зміну ризику в часі залежно від поведінки системи та оператора;

набуло подальшого розвитку:

- методи формалізації людського фактору в системах підтримки рішень (CREAM, SPAR-H, ATHEANA), шляхом розробки структурних моделей прийняття рішень оператором із використанням динамічних байєсових мереж, які враховують вплив сенсорних, когнітивних і поведінкових помилок у реальному часі при оцінці ризиків динамічного позиціонування;

- математичні моделі руху суден у режимі динамічного позиціонування, в яких удосконалено структуру керування через введення параболічних регуляторів із нечутливою зоною, з метою підвищення точності утримання позиції судна в умовах вітрових і течійних збурень, що підтверджено результатами моделювання.

Практичне значення результатів дослідження. Результати дисертаційної роботи мають суттєве практичне значення для підвищення рівня безпеки морських операцій із використанням систем динамічного позиціонування (DP). Запропонована методологія дозволяє автоматизувати виявлення потенційно небезпечних сценаріїв (drive-off, drift-off, blackout) з урахуванням зовнішніх збурень, стану технічних систем та оператора; забезпечити оперативне прогнозування розвитку ситуації та підтримку прийняття рішень на основі адаптивних моделей ризику; формалізувати вплив людського чинника у процесі управління, враховуючи реакційну здатність оператора, стресові стани та когнітивне перевантаження; підвищити точність

керування DP-системою завдяки використанню модифікованих параболічних регуляторів; інтегрувати тренажерні сценарії для навчання екіпажу, калібрування DPRA-моделі та формування шаблонів реакцій; створити інтерфейси для впровадження DSS (Decision Support System), що надають оператору рекомендації в критичних ситуаціях; застосовувати розроблені рішення в автономних морських системах (ASOG) для підвищення рівня безпеки й автономності; адаптувати DPRA-моделі до конкретних умов експлуатації, типу операції, судна, навігаційного середовища та рівня підготовки екіпажу.

Розроблені моделі впроваджені у освітньо-професійні та наукові програми Національного університету «Одеська морська академія» для студентів спеціальності J5 Морський та внутрішній водний транспорт, використані у роботі державного підприємства «Морська пошуково-рятувальна служба», судноплавних компаній, зокрема, «Марін Тех Сервіс» та декількох інших, а також використані у морських тренажерних центрах і соціальних мережах.

Особистий внесок здобувача. Усі положення, результати та наукові розробки, що виносяться на захист у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. У публікаціях, створених у співавторстві, автору належать ті положення, які прямо відображають його науковий внесок у розробку моделей, структур, алгоритмів та висновків, що становлять основу дисертації.

Зокрема, у публікації [1] здобувачем самостійно розроблено структуру моделей DPRA, алгоритми формування дерева подій, а також виконано чисельне моделювання часової еволюції ризиків у DP-середовищі. У роботі [2] здобувач здійснив математичне моделювання температурних режимів ГД у режимі DP та обґрунтував вплив теплових збурень на точність утримання позиції. У роботі [3] автором запропоновано структуру параболічного регулятора з нечутливою зоною та проаналізовано його переваги порівняно з класичними ПІД-регуляторами.

У публікації [4] здобувачем проведено ідентифікацію шаблонів помилок операторів DP-систем (DPO) на основі тренажерних сценаріїв і здійснено моделювання факторів когнітивного перевантаження. У роботі [5] особистим внеском автора є моделювання взаємодії буксирів із суднами у складних умовах маневрування, що стало прототипом для побудови частини моделі ризику DP-сценаріїв.

У матеріалах апробації [6–10] здобувач: сформулював принципи побудови дерева відмов DP-систем; адаптував методи аналізу людського чинника (CREAM, ATHEANA) до морських умов; запропонував евристичні DSS-підказки на основі поведінкових реакцій DPO; здійснив моделювання аварійних кейсів та апробацію DPRA-алгоритмів у рамках симуляцій та тренажерних сценаріїв. У одноосібній монографії [11] автором узагальнено теоретичну базу систем динамічного позиціонування, закладено методологічні основи оцінки ризиків, виконано систематизацію підходів до автоматизованого прийняття рішень в умовах динамічної невизначеності.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати дисертаційного дослідження були апробовані на низці міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій, семінарів та круглих столів, що дозволило здійснити їх публічне обговорення, отримати фахові відгуки та верифікувати практичну значущість запропонованих рішень.

Зокрема, результати дослідження були представлені та обговорені на таких наукових заходах:

- науково-технічна конференція “Судноводіння, морські перевезення та технології” “Navigation, Shipping and Technology” (NST-2021), м. Одеса, Україна, 18-19 листопада 2021 р.;
- науковий семінар “Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок”, Військова академія, м. Одеса, 20 січня 2025 р.;

- 5-та Міжнародна науково-практична конференція “European Congress of Scientific Discovery”, Барселона, Іспанія, 28-30 квітня 2025 р.;
- 10-та Міжнародна науково-практична конференція “Scientific Achievements of Contemporary Society”, Лондон, Велика Британія, 1-3 травня 2025 р.;
- 3-я Міжнародна конференція “Modern Science, Economy and Digital Innovation”, Бухарест, Румунія, 7-9 травня 2025 р.

Публікації. Основні результати дисертації викладено в 11 публікаціях, з них 3 - наукові статті, які включені до переліку наукових фахових видань України, 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 5 - тези доповідей на наукових та науково-практичних конференціях, 1 - монографія.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

Основна частина викладена на 167 сторінках тексту, список використаних джерел включає 251 найменування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ РИЗИКІВ У СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

1.1 Введення в проблематику динамічного позиціонування і оцінки ризиків

Активний розвиток нафтогазової галузі та видобувної інфраструктури на морському шельфі суттєво підвищив необхідність у виконанні технічних операцій у складних морських та гідрометеорологічних умовах що, у свою чергу, супроводжується зростанням рівня експлуатаційних ризиків. Одним із ключових засобів забезпечення навігаційної безпеки та безпеки виробничих операцій, проведення бурових, монтажних і сервісних робіт, в таких умовах, є використання систем динамічного позиціонування (DP), які дозволяють судну або плавучому об'єкту утримувати задану позицію без застосування якірного оснащення.

Аналіз статистичних звітів свідчить про стабільно високий рівень реєстрації подій, пов'язаних із підтриманням позиції DP-суден (DP Station Keeping Reports), у межах 120-140 випадків щороку впродовж 2018-2023 років. Водночас відмови в рушійно-пропульсивному контурі залишаються однією з найпоширеніших причин порушення позиціонування, становлячи 30-35% від загальної кількості інцидентів. Попри впровадження комплексу заходів, спрямованих на підвищення надійності енергетичних та керуючих систем, темпи зменшення частоти відмов залишаються помірними [1, 2].

Так, за останні два роки з 2022 по 2023 роки спостерігається незначне зростання кількості інцидентів з рушіями, що вимагає посилення контролю за технічним станом систем рушіїв та удосконалення методів превентивної діагностики. І це підтверджується тенденційно, що рушії залишаються основним критичним елементом при експлуатації DP-суден.

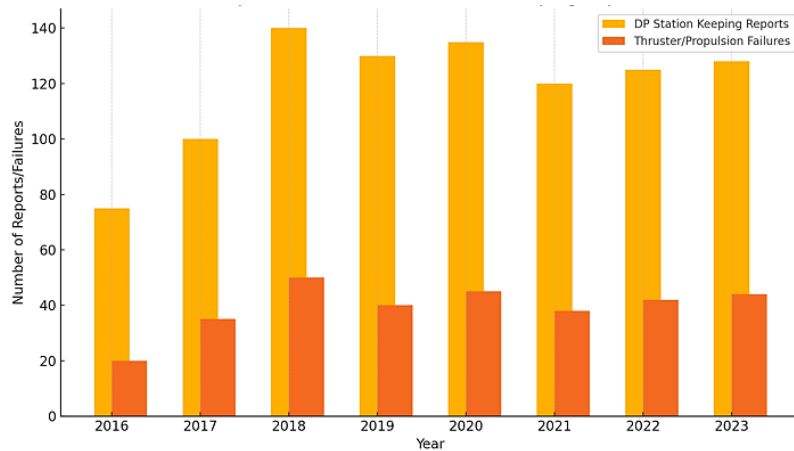


Рис. 1.1 - Відмови рушіїв та рушійних установок у звітах з експлуатації станцій DP (2016-2023 р.р.)

Система динамічного позиціонування (DP) є інтегрованою керуючою системою, яка об'єднує численні технічні й операторські компоненти. На рисунку 1.2 наведено типову функціональну структуру взаємодії основних елементів DP-системи.

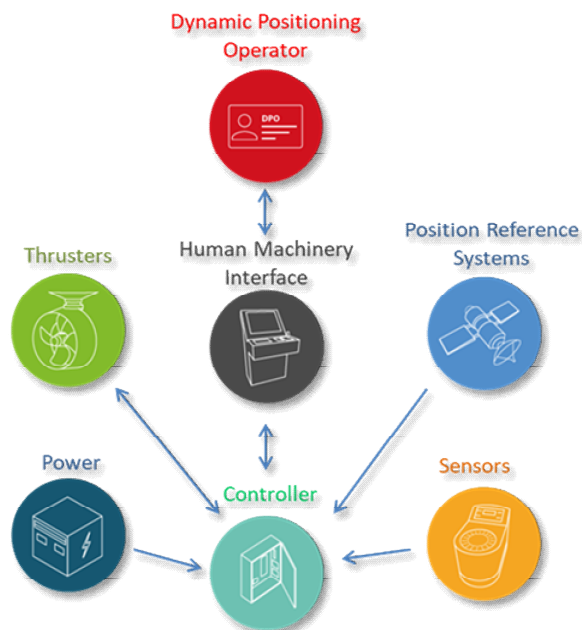


Рис. 1.2 - Структура системи динамічного позиціонування судна

Як показано на схемі, центральним елементом системи є контролер, який виконує роль обчислювального ядра. Він приймає сигнали від сенсорних пристроїв (GPS, гірокомпас, гідроакустика), позиційних референтних систем (PRS), а також керує роботою енергетичних систем та рушіїв [3, 4]. Інтерфейс взаємодії "людина-машина" (HMI) забезпечує DPO (оператору процесу динамічного позиціонування) доступ до контрольних параметрів, дозволяючи йому в реальному часі коригувати дії системи у разі виникнення нестандартної ситуації [5, 6].

У сучасних DP-системах ключову роль у забезпеченні стабільного позиціонування відіграє оператор динамічного позиціонування (DPO). Для прийняття рішень він використовує спеціалізований інтерфейс, який надає візуалізацію поточного стану судна, напрямку і сили зовнішніх впливів (вітер, течія), а також прогнозовану траєкторію.

На рисунку 1.3 наведено приклад типового відображення даних на робочому екрані системи DP.

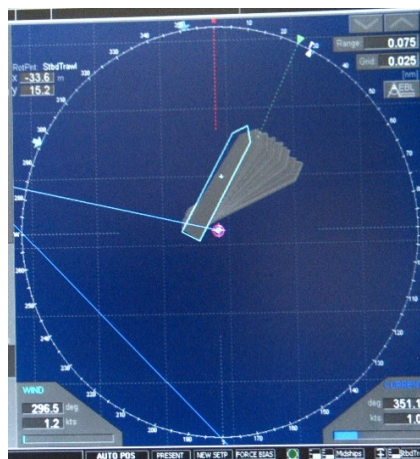


Рис. 1.3 - Інтерфейс оператора системи динамічного позиціонування (DP)

Як видно з інтерфейсу, DPO має доступ до усіх основних параметрів навколишнього середовища, а також до прогнозованої позиції судна на кілька хвилин вперед. Важливим елементом є відображення векторів дії вітру (WIND)

та течії (CURRENT), що дозволяє оператору оцінювати зовнішні збурення та коректувати налаштування системи. Інтерфейс також забезпечує візуалізацію фактичного руху судна та дає можливість оперативно втрутитися в алгоритм роботи, у разі відхилення від заданого курсу або порушення меж зони безпеки.

У системах динамічного позиціонування ключовими небезпеками є два базові типи аварійних ситуацій - Drive Off та Drift Off. У першому випадку судно самостійно зміщується у результаті некоректної роботи рушіїв або помилок контролера. У другому судно пасивно дрейфує внаслідок втрати здатності протистояти зовнішнім збуренням (вітер, течія), зазвичай через відмову рушіїв або енергосистеми. Ці типи подій можуть бути спричинені як технічними збоїми, так і людським фактором [7, 8].

Для кращого розуміння послідовності аварійних сценаріїв у DP-системі доцільно використовувати метод побудови дерев подій. Цей підхід дозволяє візуалізувати як окремі відмови, так і їх комбінації, що призводять до різних кінцевих станів. На рисунку 1.4 наведено спрощене дерево подій, яке демонструє сценарії деградації системи та ймовірні результати, успішне утримання позиції або DRIFT OFF.

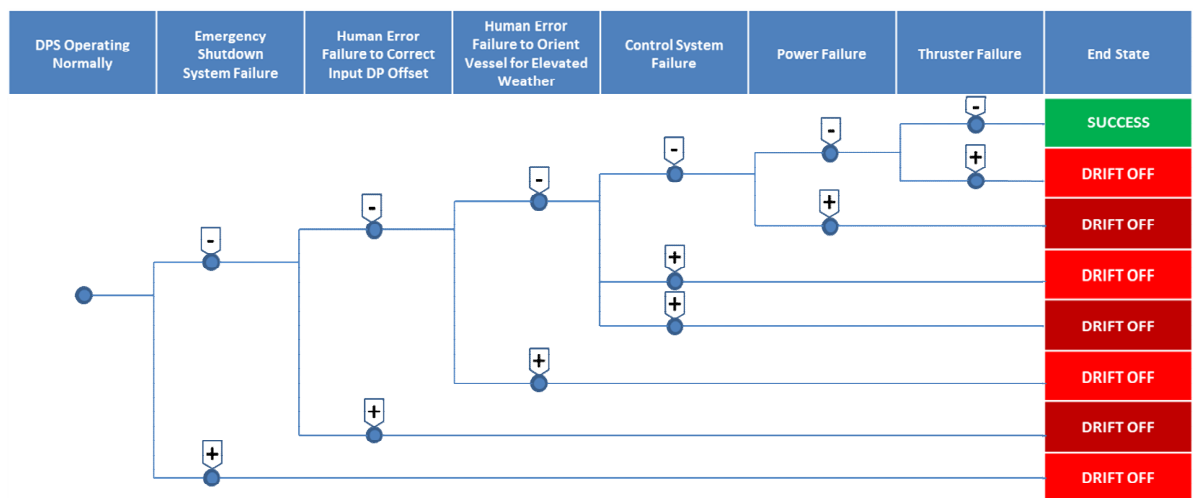


Рис. 1.4 - Дерево подій системи динамічного позиціонування з кінцевими станами

Так, дерево подій демонструє типову логіку деградації DP-системи де початковий стан це нормальна робота системи (DPS Operating Normally). Далі відбувається поетапне накопичення збоїв відмова системи аварійного вимкнення (Emergency Shutdown), людські помилки при орієнтуванні судна або введенні параметрів, збої в контрольній системі, і, нарешті, відмова живлення або рушіїв. У більшості сценаріїв кінчним результатом є DRIFT OFF, тобто втрата здатності утримувати позицію, що загрожує безпеці як людей, так і об'єктів довкілля [9, 10].

Крім дерев подій, для структурованого аналізу причин та механізмів формування аварійних ситуацій у DP-системах широко застосовується підхід дерев відмов (Fault Tree Analysis), такий підхід дозволяє описувати ієрархію збоїв, від загального наслідку (наприклад, втрата позиції) до первинних причин, які включають як технічні, так і людські чинники.

На рисунку 1.5 зображено узагальнену структуру дерева відмов із декількома рівнями причинного зв'язку.

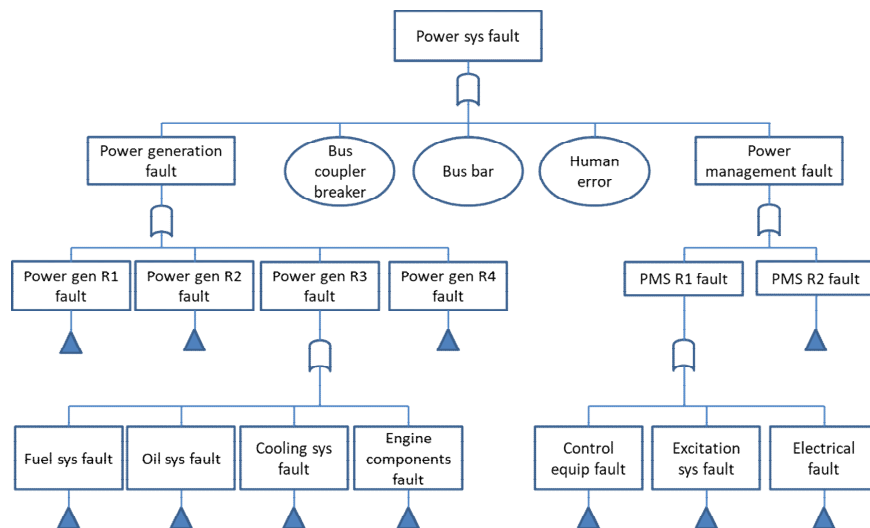


Рис. 1.5 - Узагальнена структура дерева відмов у DP-системі

Як видно зі структури, верхній рівень відображає критичну подію (наприклад, втрату позиції судна), другий - основні категорії причин (відмова

обладнання, помилки DPO, збій програмного забезпечення), а нижні рівні деталізують первинні фактори, що можуть активізувати ці сценарії, що забезпечує системне бачення ризиків і використовується як у класичних PRA-моделях, так і в сучасних динамічних DPRA-системах [11, 12].

Як показано, відмова окремих елементів DP-системи може призводити до критичних наслідків. Проте реальні аварії часто формуються не через одну причину, а внаслідок накладання технічних збоїв, зовнішніх умов та людського фактору.

На рисунку 1.6 представлено інтегровану модель, що демонструє основні траєкторії розвитку аварійних сценаріїв типу Drive Off та Drift Off із деталізацією людських помилок. Модель демонструє взаємозв'язок між технічними і людськими чинниками, які за певних зовнішніх умов (наприклад, погоди) можуть призвести до втрати позиції або контакту з об'єктами.

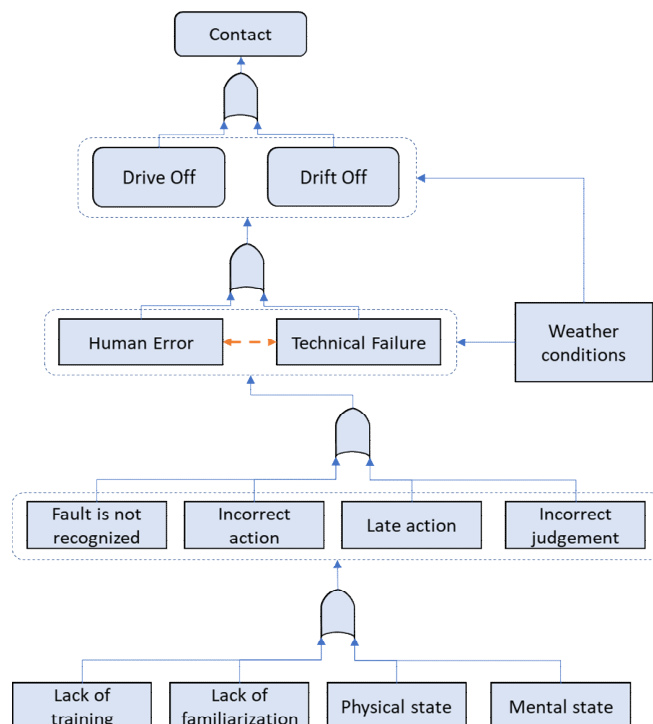


Рис. 1.6 - Інтегрована причинно-наслідкова модель аварій у DP-системах

Представлена схема ілюструє інтегровану модель формування аварійних сценаріїв у DP-системах, де ключову роль відіграє взаємодія технічних відмов і людського фактору в контексті зовнішніх умов (зокрема, метеорологічних). Зокрема, відмова технічних компонентів може слугувати каталізатором операторських помилок, які проявляються у формі несвоєчасного реагування, неадекватної оцінки ситуації або вибору некоректних дій. Такі помилки, своєю чергою, часто є наслідком недостатнього навчання, відсутності адаптації до конкретної системи, а також впливу психофізіологічного стану персоналу. Модель підтверджує, що реальні аварії мають багатфакторний характер, і тому потребують динамічної, багаторівневої оцінки ризиків, здатної враховувати часові, ситуаційні й поведінкові аспекти [13, 14].

На схемі (рис.1.7) відображено багатшарову архітектуру, де вхідні події різної природи агрегуються на середньому рівні впливу та визначають узагальнені вихідні сценарії, як демонстрація складності побудови причинно-наслідкових зв'язків у DP-системах.

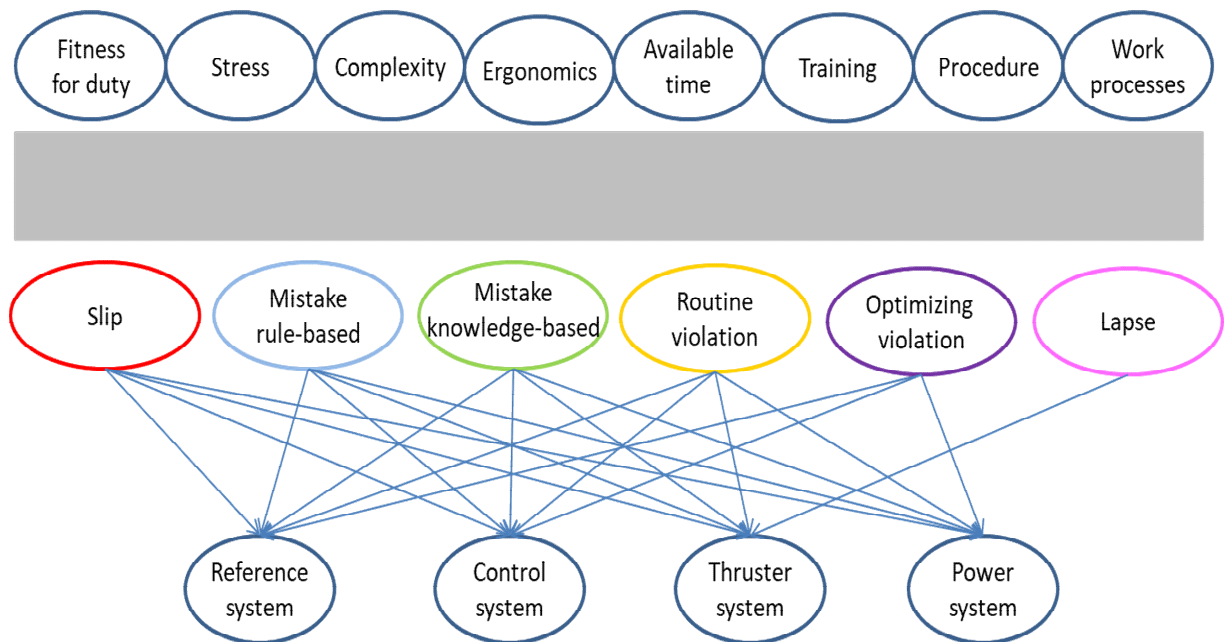


Рис. 1.7 - Модель взаємодії множинних факторів ризику
(нейромережевий підхід)

У деяких дослідженнях для моделювання складної багатофакторної взаємодії у DP-системах використовується нейромережева концепція впливів, яка дозволяє агрегувати як технічні, так і людські або зовнішні чинники у вигляді вхідних нейронів, об'єднаних через приховані рівні узагальнення, і формувати прогнозовані сценарії відмов, а такий підхід використовується в DPRA як інструмент прогнозу ризиків у реальному часі [15, 16].

Із розвитком автоматизованих DP-систем постає питання класифікації їх за рівнем взаємодії та автономності. Як показано на рисунку 1.8, системи можуть працювати як у централізованій конфігурації, так і як мультиагентні, з повною кооперацією або розподіленим управлінням.

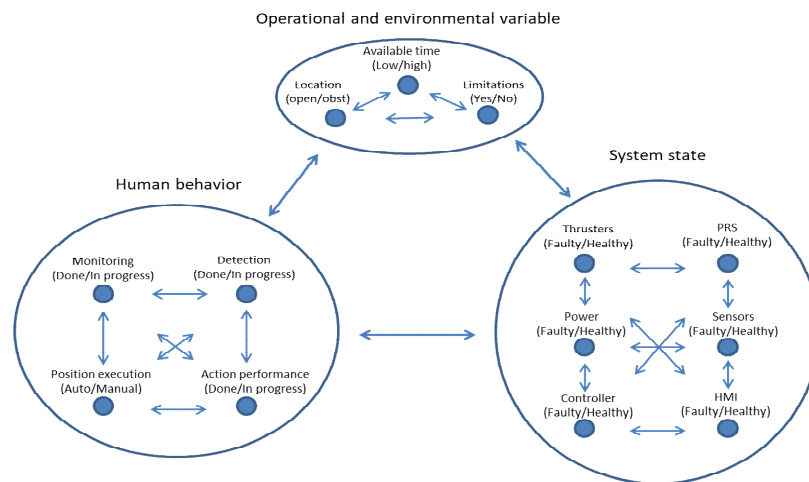


Рис. 1.8 - Класифікація DP-систем за ступенем автономності та взаємодії

Модель демонструє різні рівні DP-систем: від централізованого до розподіленого керування, включаючи обмін даними між модулями й варіанти кооперативного управління в автономних системах. Цей поділ важливий при розробці алгоритмів оцінки ризику та впровадженні DPRA у системи наступного покоління [17, 18].

У зв'язку з високою критичністю аварій, що виникають у системах динамічного позиціонування, існує об'єктивна потреба у підвищенні ефективності методів оцінки ризиків. Традиційні підходи, орієнтовані на

попередній аналіз небезпек, не враховують змінність умов, поведінкові фактори оператора та часову еволюцію системного стану. Це обумовлює актуальність розробки динамічних імовірнісних моделей оцінки ризиків (DPRA), які б дозволили здійснювати реагування на ризики в реальному часі з урахуванням комплексного впливу технічних, організаційних та людських факторів [19, 20, 21].

На основі аналізу понад 700 інцидентів, що сталися у період з 2004 по 2015 рік, за звітами IMCA, було виявлено ключові тенденції у типах суден, фазах експлуатації та причинно-наслідкових механізмах втрати позиції.

Згідно даними на рисунку 1.9, найбільша частка інцидентів припадає на судна, що виконують бурові, обслуговуючі та кабельні операції.

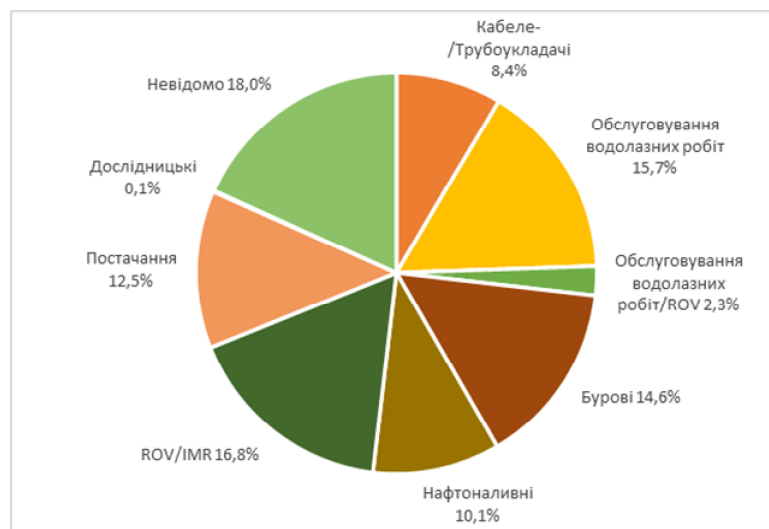


Рис. 1.9 - Розподіл інцидентів за типом суден (ROV: дистанційно керований апарат, IMR: обслуговування та ремонт підводних свердловин)

Рисунок 1.10 демонструє, що найбільше збоїв трапляється під час стабілізації позиції або переміщення, тоді як значна частка інцидентів не була прив'язана до конкретної фази.

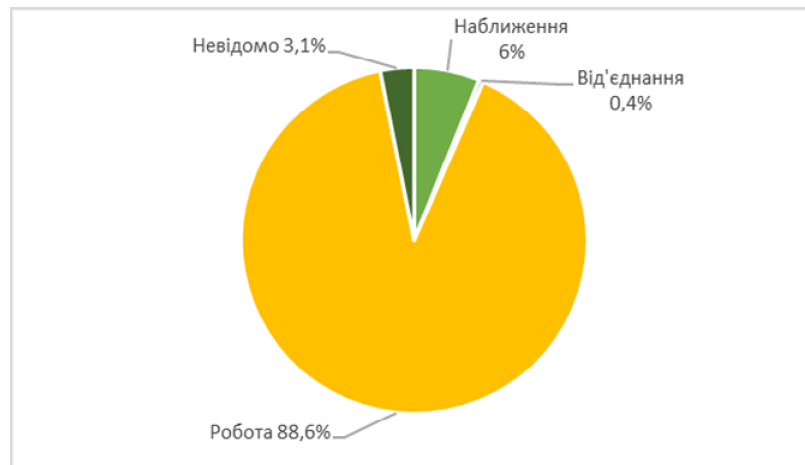


Рис. 1.10 - Класифікація за фазами експлуатації

Як видно з рис. 1.11, домінують технічні відмови систем рушіїв і генераторів, а також людські помилки операторів DP.

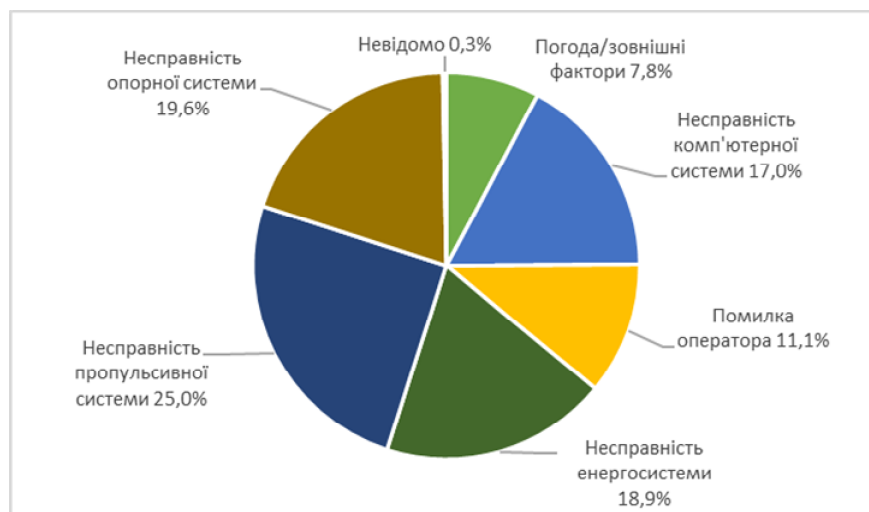


Рис. 1.11 - Розподіл тригерів інцидентів (початкових подій)

Кінцеві стани таких інцидентів (Рис. 1.12) здебільшого класифікуються як "drive off", "drift off" або "втрата позиції", що підтверджує складність моделей взаємодії між технічними і людськими чинниками.

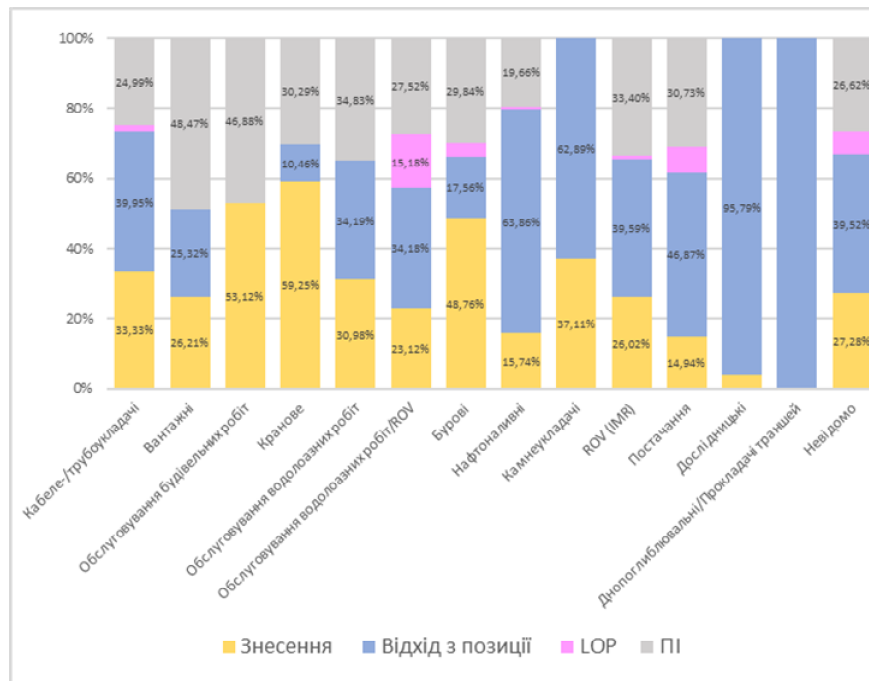


Рис. 1.12 - Наслідки інцидентів для різних типів суден та операцій (LOP: втрата позиції, ПІ: потенційний інцидент, ROV: дистанційно керований апарат, IMR: обслуговування та ремонт підводних свердловин)

Представлена статистика в таблиці 1.1 ілюструє реальну складність ризик-профілю систем DP, де більшість інцидентів спричинені комбінацією технічних відмов та поведінкових похибок. Це підтверджує доцільність переходу до динамічних моделей оцінки ризику (DPRA), що враховують змінність умов, адаптацію системи в часі, та взаємодію між технікою та оператором.

Таблиця 1.1 - Розподіл інцидентів систем DP за звітами IMCA (2015-2025)

№	Категорія	Основні спостереження	Частка (%)
1	Тип судна	Бурові, кабельні, ROV/IMR	~65
2	Фаза операції	Стабілізація, перехід, утримання	~55
3	Причини інцидентів	Відмова рушія, генератора, сенсорів; людський фактор	~60 техн., ~25 люд.
4	Кінцеві стани інцидентів	Drive-off, Drift-off, Втрата позиції	~70

Джерело: адаптовано за даними звітів IMCA та аналізу інцидентів

Представлена статистика ілюструє реальну складність ризик-профілю систем DP, де більшість інцидентів спричинені комбінацією технічних відмов та поведінкових похибок, що підтверджує доцільність переходу до динамічних моделей оцінки ризику (DPRA), що враховують змінність умов, адаптацію системи в часі, та взаємодію між технікою та оператором.

1.2 Основи динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA)

Традиційні підходи до аналізу ризиків, зокрема класичний імовірнісний аналіз ризику (PRA), базуються на фіксованих сценаріях розвитку подій, які не враховують змінність умов у часі та адаптивну поведінку технічних і людських компонентів системи.

У системах динамічного позиціонування суден, де характер загроз постійно змінюється внаслідок впливу навколишнього середовища, стану обладнання та поведінки оператора, застосування статичних PRA-моделей є обмежено ефективним. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA), підходу, який дозволяє моделювати розвиток подій у часі, включаючи взаємодію технічних збоїв, помилок людини та змін у зовнішніх умовах [22].

Основною відмінністю підходу DPRA є модульна архітектура системи оцінки ризиків, побудована на принципі послідовного перетворення вхідних даних у формалізовану оцінку поточного рівня ризику. Потік даних реалізується як послідовна обробка сигналів та подій у чотирьох функціональних доменах: ідентифікації подій, оцінки надійності систем, визначення поточного технічного стану та моделювання ризику.

На рисунку 1.13 представлено узагальнену структуру потоку даних у системі DPRA.

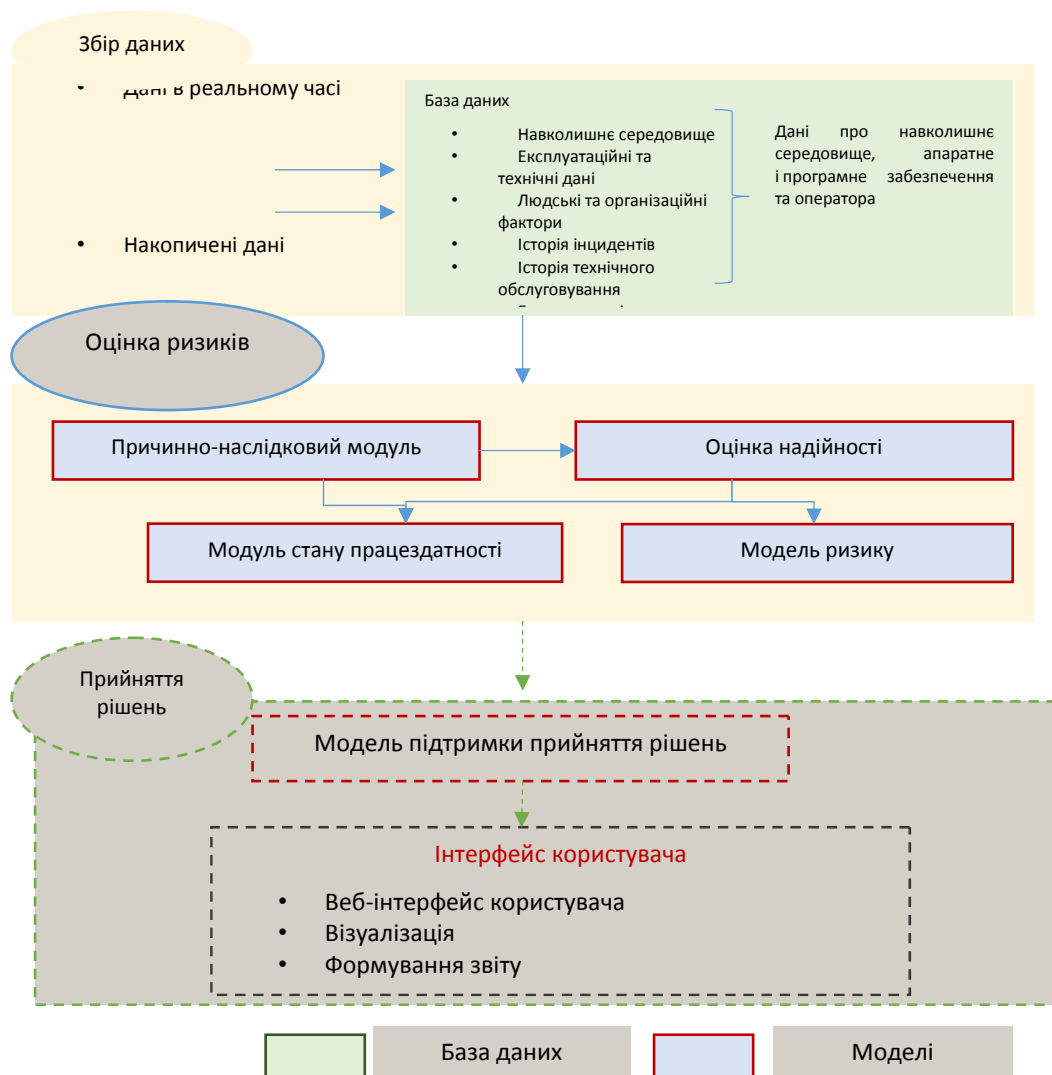


Рис. 1.13 - Узагальнений потік даних у системі DPRA

Схема ілюструє логічну послідовність передачі інформації між модулями аналізу подій, надійності, технічного стану та оцінки ризику, що дозволяє отримати адаптивну ймовірнісну характеристику поточної ситуації. Як видно зі схеми, кожен етап перетворення даних відповідає окремому модулю, тобто причинно-наслідковий модуль, який виявляє взаємозв'язок між окремими подіями. Далі їде модуль надійності, який розраховує ймовірність збоїв системи, модуль технічного стану відстежує рівень деградації ключових компонентів, та модуль ризику агрегує результати для побудови інтегрального показника ризику, що дозволяє враховувати не лише наявність чи відсутність

окремих відмов, а й поточний технічний контекст системи, її схильність до аварій, а також зовнішні чинники [23, 24].

Першим логічним компонентом у системі DPRA є модуль причинно-наслідкових зв'язків, що відповідає за ідентифікацію подій та побудову сценаріїв з урахуванням їхніх причин і наслідків. Цей модуль аналізує накопичені дані разом з інформацією в режимі реального часу, і формує основу для подальшого моделювання дерев подій і дерев відмов. Виявлення ключових режимів збоїв, їхніх причин та шляхів розвитку дозволяє сформувати структуровану модель поведінки системи у критичних станах [25, 26].

Схема на рис. 1.14 демонструє взаємозв'язок між накопиченими історичними даними, даними в реальному часі, і механізмами формування структур ризиків через дерева подій та відмов.

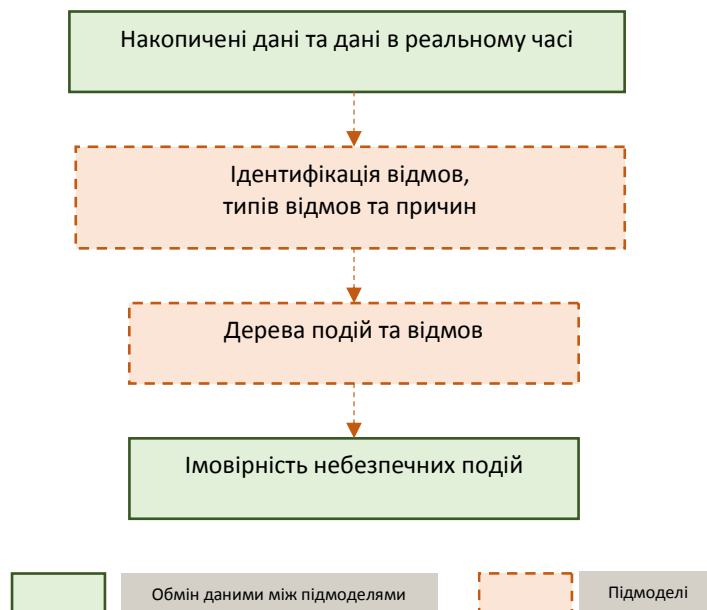


Рис. 1.14 - Модуль причинно-наслідкових зв'язків у структурі DPRA

Основною функцією модуля є системна трансформація необробленої інформації у формалізовані причинно-наслідкові моделі, що забезпечують основу для обчислення ймовірностей у наступних модулях DPRA, що дозволяє

відобразити логіку розвитку відмов, спрогнозувати потенційні сценарії деградації системи та визначити ключові вузли вразливості.

Другим функціональним елементом у структурі DPRA є модуль оцінки надійності, що відповідає за обчислення ймовірностей виникнення збоїв та визначення ступеня надійності основних підсистем. У цьому модулі здійснюється обробка вихідної інформації з модуля причинно-наслідкових зв'язків, зокрема, дерев подій і дерев відмов, а також системних накопичених даних і інформації в реальному часі. Схема на рисунку 1.15 ілюструє механізм обробки вхідних даних для обчислення ймовірностей виникнення критичних відмов, включаючи об'єднання статистичних характеристик та динамічних параметрів [27, 28, 29].

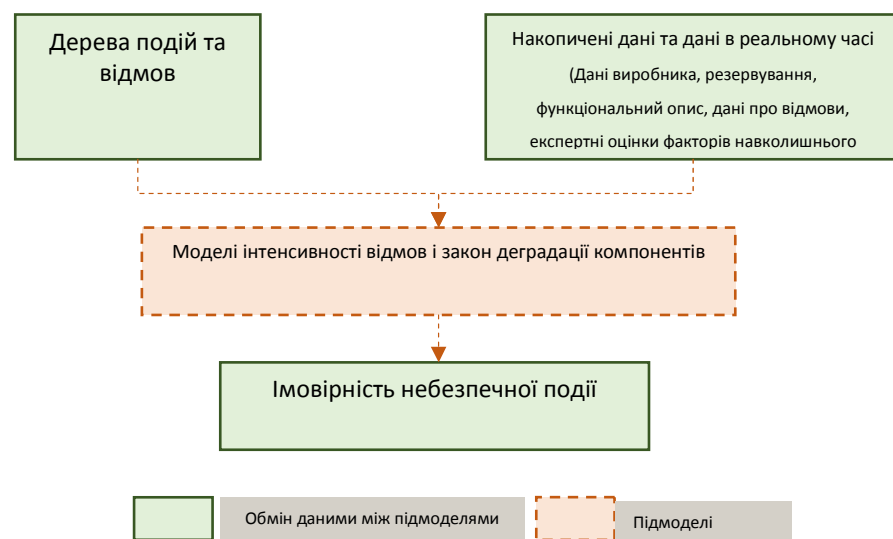


Рис. 1.15 - Модуль оцінки надійності у структурі DPRA

Оцінка надійності проводиться з використанням гібридних моделей на основі статистичних даних, фізичних рівнянь або їх поєднання та дозволяє відобразити як історичну частоту відмов, так і поточний технічний стан елементів, що змінюється у часі. Отримані ймовірнісні характеристики є

основою для розрахунку інтегрального ризику у фінальному модулі, а також дають змогу адаптувати поведінку системи в режимі реального часу [30, 31].

Третім елементом в архітектурі DPRA є модуль оцінки стану працездатності системи, завданням якого є визначення відхилень поточних характеристик від базових експлуатаційних норм. У межах цього модуля здійснюється порівняння даних у реальному часі з еталонними показниками, що дозволяє ідентифікувати потенційні збої або аномалії в роботі системи до їх фактичної реалізації.

На рисунку 1.16 показано схему логіки роботи цього модуля.

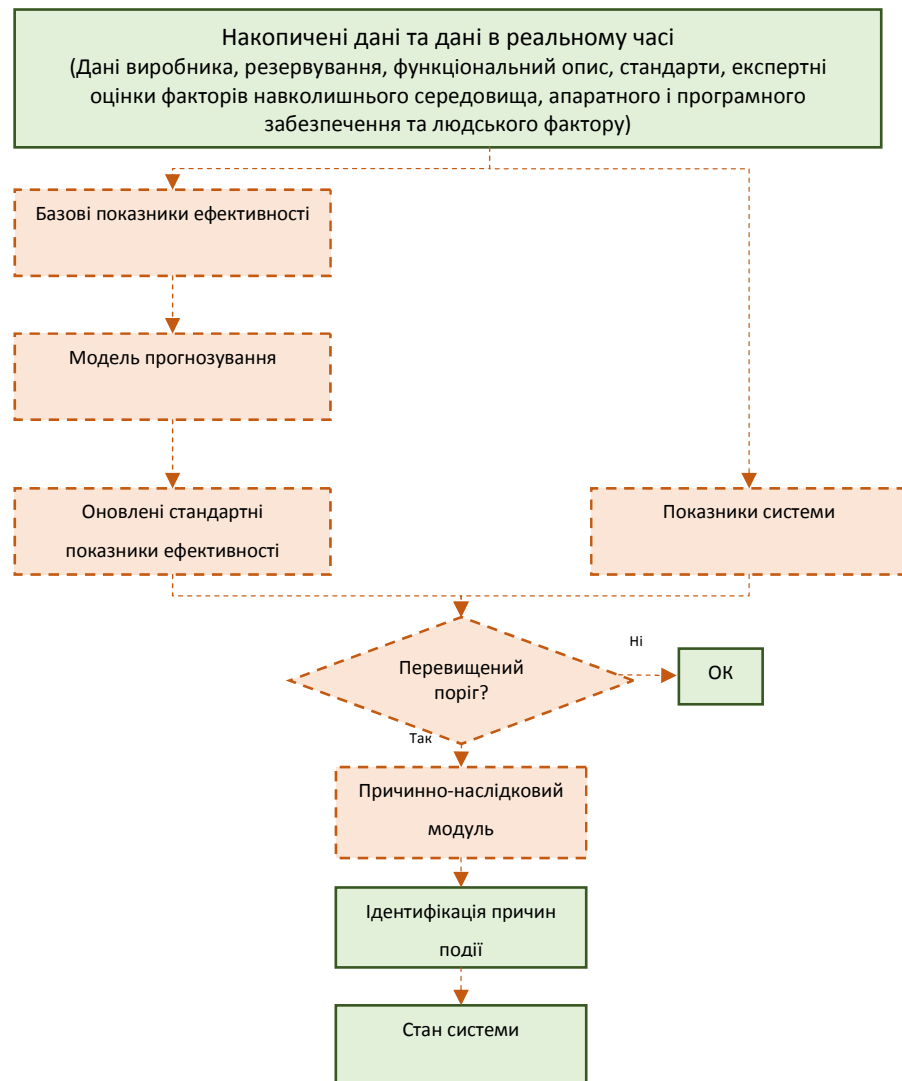


Рис. 1.16 - Модуль оцінки стану працездатності в структурі DPRA

Аналіз проводиться за допомогою порівняння статичних показників продуктивності системи з динамічно оновленими даними, отриманими з сенсорів та системного моніторингу. У разі виявлення суттєвих відхилень від норми, активується модуль причинно-наслідкової діагностики, який здійснює ідентифікацію можливої причини зниження працездатності та здійснювати превентивне реагування на технічні загрози до їхнього фактичного прояву в аварійній ситуації [32, 33].

Четвертим етапом в архітектурі DPRA є модуль моделювання ризику, який виконує інтеграцію результатів попередніх етапів для розрахунку інтегрального рівня ризику системи. У межах цього модуля здійснюється обчислення ризику як добутку ймовірності виникнення події на величину її наслідків.

На рисунку 1.17 наведено загальну схему процесу моделювання ризику в системах DP.

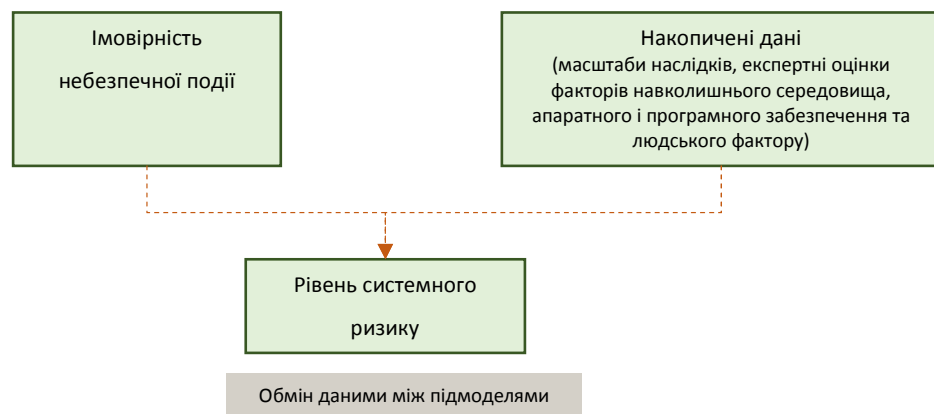


Рис. 1.17 - Модуль моделювання ризику у структурі DPRA

Вихідними даними для модуля моделювання ризику є ймовірності відмов, розраховані модулем оцінки надійності, наслідки відмов, що визначаються експертно залежно від типу системи DP, умов навколишнього середовища та режиму роботи. Об'єднання цих параметрів дозволяє отримати кількісну оцінку

ризик, яка може змінюватися у режимі реального часу у відповідь на динамічні зміни параметрів системи [34, 35, 36].

Завершальним компонентом у структурі системи DPRА є модуль підтримки прийняття рішень (Decision Support Module), який функціонує як інтерфейс між аналітикою ризику та операційними діями користувача або системи. Його призначення, надати DPO (або автономній системі) інформацію для обґрунтованого реагування на зміну рівня ризику, що забезпечує адаптивну поведінку системи в умовах невизначеності.

На рисунку 1.18 наведено концептуальну модель модуля підтримки прийняття рішень у структурі DPRА (схема демонструє зв'язок між результатами модулів оцінки ризику, технічного стану та надійності з базою знань і логікою формування керуючих дій або рекомендацій оператора).

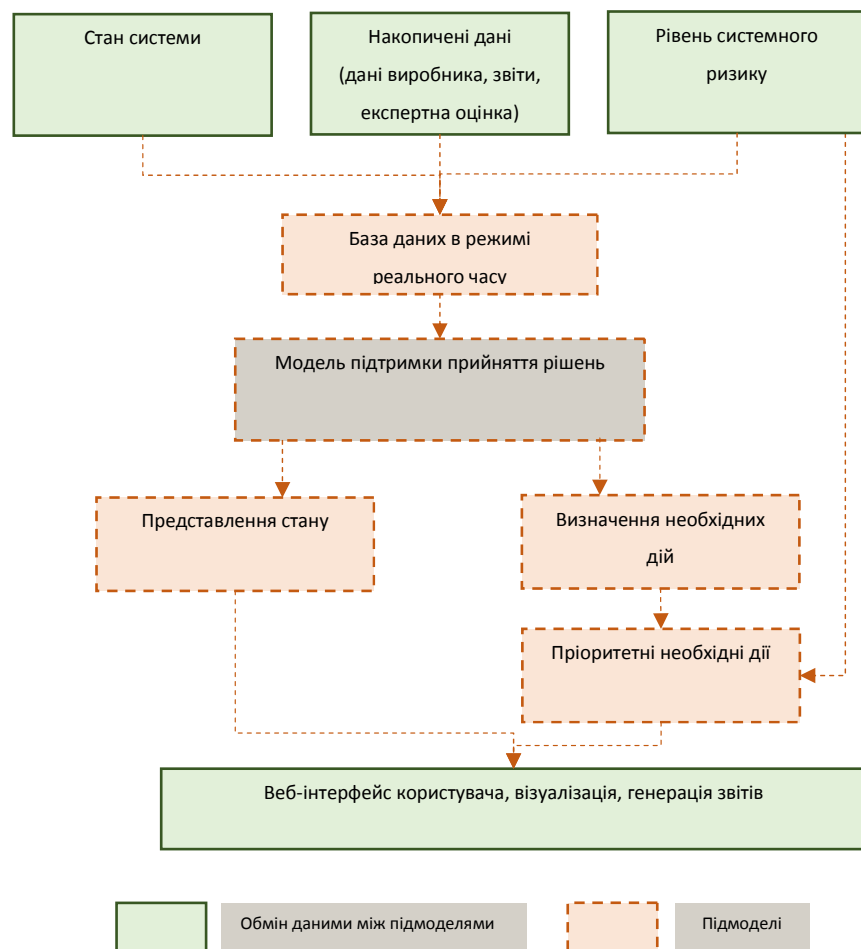


Рис. 1.18 - Модель підтримки прийняття рішень у системі DPRА

Інформація, згенерована на попередніх рівнях (ризик, надійність, працездатність), накопичується в базі даних та використовується для оновлення актуальних рекомендацій. Система може формувати автоматичні попередження, параметричні межі дій, або навіть прямі сигнали втручання (наприклад, автоматичне зміщення судна у безпечну зону), підсумовуючи таким чином, що модуль підтримки рішень є ключовим механізмом інтеграції оцінки ризиків із процедурою управління в системах динамічного позиціонування [37, 38].

Для реалізації математичної моделі оцінки ризиків у DPRA важливо визначити формальні основи побудови оцінки ймовірностей подій. У таблиці 1.2 узагальнено основні математичні підходи до визначення частоти виникнення подій та надійності функціонування компонентів системи. Наведені вирази дозволяють здійснювати кількісну оцінку надійності з урахуванням типу розподілу, інтенсивності відмов та інших параметрів.

Таблиця 1.2 - Основні математичні моделі для оцінки частоти подій у DPRA

Тип базової події	Зазвичай використовувані моделі ймовірності базової події	Дані, необхідні для кількісної оцінки моделей
Ініціююча подія	<p>Модель Пуассона для визначення ймовірності k подій за час t:</p> $Pr(k) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$ <p>де t: Час виконання завдання λ: Частота</p>	Кількість подій k за час t
Відмова компоненту під час подачі команди на виконання	Постійна ймовірність відмови під час подачі команди на виконання, або q	Кількість подій відмови k за загальну кількість команд на виконання N
Резервний компонент з часом виходить з ладу або компонент змінює стан між тестами (відмови	Постійна інтенсивність відмов елементів, які перебувають у ненавантаженому резерві	Кількість подій k за загальний час у ненавантаженому резерві T

виявляються лише під час функціонального тестування)	$Q = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_s T_s}}{\lambda_s T_s}$ <p>T_s: Час між тестами λ_s: Інтенсивність відмов елементів, які перебувають у ненавантаженому резерві</p>	
Робочий компонент не запускається або компонент змінює стан під час виконання завдання (стан компонента постійно контролюється)	<p>Постійна частота відмов</p> $U = 1 - e^{-\lambda_0 T_m} \approx \lambda_0 T_m$ <p>T_m: Час виконання завдання λ_0: Наближення частоти відмов у процесі експлуатації є прийнятним, коли $\lambda_0 T_m < 1$</p>	Кількість подій k за загальний час впливу T (загальний час роботи резервного компонента або час перебування компонента в робочому режимі)
Компонент неготовий через тестування	$Q = \frac{T_{TD}}{T_s}$ <p>T_{TD}: Тривалість тесту (тільки за відсутності сигналу перерегулювання) T_s: Час між тестами</p>	Середня тривалість тесту (T_{TD}) і час між тестами (T_s)
Компонент недоступний через технічне обслуговування (несправність виявляється лише при періодичному тестуванні або профілактичному обслуговуванні, що проводиться через регулярні проміжки часу)	$Q = \frac{T_U}{T_T}$ <p>T_U: Загальний час неготовності під час технічного обслуговування (виведення з роботи) T_T: Загальний час роботи</p>	Загальний час простою через технічне обслуговування під час роботи системи, T_U , і загальний час експлуатації T_T
Компоненти недоступні через позапланове технічне обслуговування (компоненти з постійним контролем)	$Q = \frac{\mu T_R}{T_T}$ <p>T_R: Середній час простою через технічне обслуговування [«час ремонту»] μ: Періодичність технічного обслуговування</p>	Кількість операцій з технічного обслуговування r за час T (для оцінки μ)
Резервний компонент, який ніколи не тестується. Ймовірна постійна частота відмов	$Q = 1 - e^{-\lambda_m T_F}$ <p>T_F: Час впливу до відмови λ_m: Інтенсивність відмов елементів, які перебувають у ненавантаженому резерві</p>	Кількість відмов r за T одиниць часу (в режимі очікування)

Ймовірність відмови із загальної причини	α_1 до α_m , де m – ступінь резервування	n_1 до n_m , де n_k – кількість подій відмов із загальної причини, що включають k компонентів
--	--	---

Представлені співвідношення охоплюють експоненційні, параметричні та комбіновані моделі оцінки частоти збоїв, що найчастіше застосовуються у ризик-орієнтованих підходах, та дозволяють не лише розрахувати імовірності виникнення небезпечних подій, а й адаптувати модель до різних типів технічних систем із урахуванням експлуатаційного стану та часу функціонування. Зазначені формули є базою для подальшого формування інтегрального ризику у модулі оцінки ризику системи DPRA [39].

Міжнародна морська контракторська асоціація (IMCA) розробила детальні рекомендації щодо безпечної експлуатації суден з динамічним позиціонуванням (DP), включаючи аспекти управління ризиками, процедур експлуатації та стандартів галузі.

Оцінка ризиків у морських операціях згідно з методологією IMCA (International Marine Contractors Association) передбачає послідовне проходження п'яти ключових етапів, що наведені в таблиці 1.3 [40, 41].

Таблиця 1.3 - Основні етапи оцінки ризиків за методологією IMCA

№	Етап	Зміст
1	Ідентифікація потенційних загроз	Визначення можливих подій, які можуть призвести до втрати позиції судна, таких як відмова обладнання або несприятливі погодні умови
2	Аналіз наслідків	Оцінка впливу ідентифікованих загроз на безпеку операцій, навколишнє середовище та обладнання
3	Оцінка ймовірності	Визначення ймовірності виникнення кожної загрози з урахуванням історичних даних та експертних оцінок

4	Розробка заходів зниження ризику	Визначення та впровадження заходів для зменшення ймовірності або наслідків ідентифікованих ризиків
5	Моніторинг та перегляд	Постійне спостереження за ефективністю впроваджених заходів та оновлення оцінки ризиків у разі зміни умов

Схема на рисунку 1.19 відображає ключові етапи побудови та адаптації моделі оцінки ризиків: від збору вихідних даних до ітеративного оновлення ризик-оцінки в часі.



Рис. 1.19 - Алгоритм побудови та актуалізації моделі DPRA

Алгоритм демонструє життєвий цикл моделі оцінки ризиків у рамках DPRA. Він охоплює визначення системних меж і збір надійних даних; перевірку достовірності й повноти інформації; побудову вихідної моделі з подальшим ітеративним уточненням при надходженні нових подій або сигналів та безперервне оновлення результатів оцінки ризиків у часі. Таким чином, ця

структура забезпечує адаптивність, зворотній зв'язок, і високу точність оцінювання поточного рівня небезпеки в складних морських операціях.

Схема на рисунку 1.20 демонструє характерний приклад розвитку інциденту в системі динамічного позиціонування: від початкових умов експлуатації до кінцевого стану, втрати позиції. На верхньому рівні представлені характеристики середовища та системи, далі послідовність подій, що призвели до аварійного сценарію.

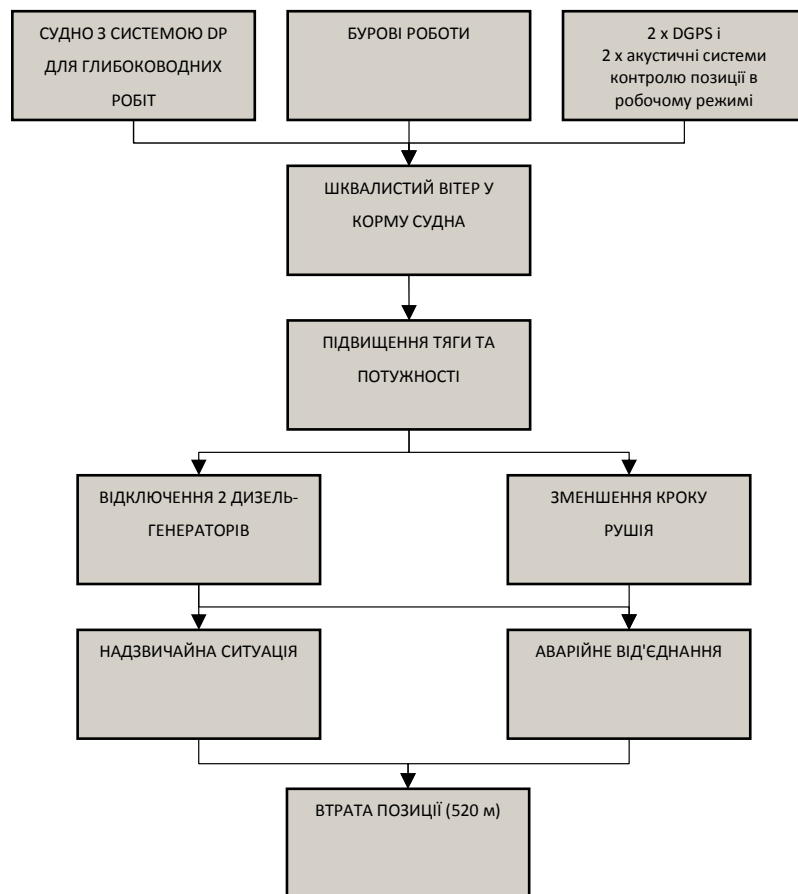


Рис. 1.20 - Послідовність подій під час інциденту системи DP
(на основі даних ІМСА)

Дана послідовність демонструє типову логіку розвитку критичних ситуацій у DP-системах. Зокрема, початково система працювала штатно з активними датчиками позиціонування (DGPS, акустика), але згодом низка подій

(відмова підсистем, некоректна реакція контролера або оператора) спричинила відхилення від позиції. Кінцевим станом стало втрата позиції, що у звітах класифікується окремо від “знесення” чи “drive off”. Такий приклад ілюструє важливість побудови дерев подій та інтеграції даних ІМСА в моделі DPRA для подальшого ризик-аналізу [42, 43].

Для подальшої побудови дерев відмов та розрахунку ймовірності втрати позиції важливо мати кількісні характеристики відмов основних елементів системи DP. У таблиці 1.4 представлено типові частоти відмов критичних компонентів суднової системи динамічного позиціонування, які можуть бути використані як вихідні параметри при моделюванні ризику.

Таблиця 1.4 - Частоти відмов основних підсистем системи DP

№	Компонент системи DP	Частота відмов, 1/год (λ)	Джерело, примітка
1	Контролер позиціонування (DP)	$2,0 \times 10^{-4}$	Згідно з ІМСА D 045
2	Сенсорний блок (DGPS+MRU)	$1,5 \times 10^{-4}$	Дані з експлуатації суден
3	Силовий привід / рушій	$1,0 \times 10^{-3}$	Збірка статистики за 5 років
4	Система живлення (генератор)	$3,5 \times 10^{-4}$	Власні дані, модернізована СПБУ
5	Людський фактор (помилка DPO)	$1,2 \times 10^{-3}$	Узагальнено за SPAR-H

Таким чином, динамічна імовірнісна оцінка ризиків (DPRA) є ефективним інструментом для аналізу складних, багатофакторних систем, які функціонують в умовах невизначеності та змінного середовища. Побудова модульної структури системи, математичні моделі оцінки ймовірностей, інтеграція даних у реальному часі та приклади з практики (зокрема на базі звітів ІМСА) підтверджують можливість адаптивної побудови оцінки ризику для систем

динамічного позиціонування а представлені підходи формують основу для подальшого аналізу взаємодії технічних та людських факторів ризику [44, 45].

Особливу увагу в сучасних DPRA-системах привертає питання взаємодії між оператором, апаратним забезпеченням та програмним середовищем, оскільки саме цей трикутник найбільш вразливий до збоїв, що не завжди піддаються формалізації. У параграфі 1.3 буде розглянуто методологію врахування людського фактору, типові джерела збоїв, пов'язані з помилками оператора або некоректною інтерпретацією даних, а також ризики, пов'язані з неконтрольованими переходами станів програмного забезпечення (ПЗ).

1.3 Взаємодія оператора, апаратного та програмного забезпечення при оцінці ризиків

Незважаючи на значний прогрес у розвитку апаратних і програмних засобів автоматизації систем динамічного позиціонування, людський фактор залишається ключовим джерелом ризику в експлуатації DP-систем. Більшість аварій у DP-операціях мають складну етіологію, де технічні збої супроводжуються або посилюються помилками оператора, неадекватною реакцією або несвоєчасним втручанням. Додаткову складність формує поведінка програмного забезпечення, яке може мати приховані вразливості, неконтрольовані сценарії переходів станів або логічні помилки в алгоритмах прийняття рішень [46, 47].

У даному підрозділі пропонується розгляд ключових аспектів взаємодії оператора, ПЗ та апаратного середовища в контексті моделей оцінки ризику та аналізу вразливостей.

У таблиці 1.5 представлена типологія охоплює найбільш поширені механізми помилок операторів DP-систем і дозволяє структурувати оцінку людського фактору при формуванні моделей ризику.

Таблиця 1.5 - Типологія помилок оператора системи DP (DPO)

№	Тип помилки	Сутність помилки	Типові причини
1	Сприйняття (Perception)	Невірне зчитування показників, недооцінка тривоги	Втома, фільтрація сигналів, надмірна довіра до одного джерела
2	Діагностика (Diagnosis)	Помилкова інтерпретація ситуації, хибне визначення пріоритетів	Нестача досвіду, обмежені дані
3	Виконання (Execution)	Некоректна команда, хибний вибір режиму, помилка у введенні	Стрес, моторна дезкоординація
4	Процедурна (Rule-based)	Порушення або неправильне застосування стандартної процедури	Недостатнє навчання, суперечливі інструкції
5	Намір порушити (Violation)	Усвідомлене нехтування правилами або відключення захистів	Організаційний тиск, нехтування культурою безпеки

Джерело: Упорядковано на основі CREAM, SPAR-H, IMCA D 045

У подальших розділах ці категорії будуть використані як вхідні класи подій у моделі CREAM та SPAR-H для кількісної оцінки імовірності помилки у заданих сценаріях. Тут важливо розуміти, що жодна з категорій не є ізольованою, вони часто взаємодіють із технічними та програмними збоями, формуючи комплексні аварійні ланцюги [48, 49].

У таблиці 1.6 узагальнено найбільш часті категорії помилок, які зустрічаються у DP-інцидентах, пов'язаних із DPO.

Таблиця 1.6 - Причини помилок оператора у DP-системах: категоризація і частота

№	Категорія причини	Опис прояву	Частка в інцидентах (%)
1	Неповна або хибна інформація	DPO діє на базі неповних/спотворених даних сенсорів або GUI	25
2	Втома або зниження уваги	Зниження концентрації, сповільнена реакція	20
3	Невірне навчання	Недостатній тренінг з відхилень, старі або формальні процедури	18

4	Системна двозначність GUI	Неочевидні тривоги, погана візуалізація, відсутність кольорового кодування	15
5	Психологічний тиск / оверрід	DPO змушений ігнорувати правила, реагує «за обставинами»	12
6	Інше	Індивідуальні когнітивні особливості, багатозадачність	10

Джерело: Упорядковано за даними IMCA D 045, CREAM taxonomy, NASA HFACS

Такий зміст можна використати як еталонну матрицю причин при побудові логіки SPAR-N та ATHEANA, у вигляді впливових факторів у сценаріях ризику. Варто зазначити, що багато з них виникають не внаслідок "людського фактору", а через "людсько-системний фактор" коли програмне забезпечення не дає достатньої підтримки оператору [50, 51].

Надійність апаратного забезпечення - не єдина запорука ефективності онлайн-оцінки ризиків у морських системах. Тут, також, необхідно розуміти та враховувати суттєвий вплив на ризик людського та організаційного факторів [52, 53], відмов програмного забезпечення, а також їх взаємодії та каскадні ефекти [54, 55].

Існують дослідження конкретних проблем, пов'язаних з урахуванням людського і організаційного факторів при оцінці ризику [56-58]. Аналіз надійності оператора (human reliability analysis, HRA) спрямований на кількісну оцінку ймовірності помилки людини для заданого завдання. У [59] розслідування нещасного випадку та QRA поєднуються з використанням наявної інформації про попередній інцидент у якості вхідних даних у QRA-методології. Цей метод включає розширене розуміння ролі людського та організаційного факторів у виникненні нещасних випадків, та їх запобігання. Результат допомагає визначити небезпеки, ймовірності, бар'єри безпеки та можливі наслідки і дає більш повну картину причин та ризиків у складних системах.

На рис. 1.21 представлена структурна ієрархія прикладу програмного забезпечення. Основними підсистемами є конфігурація, контролер, датчик,

системи реєстрації даних і коди програми. Це всі апаратні компоненти, необхідні для встановлення та роботи програмного забезпечення, наприклад, функція налаштування, запущена в компоненті конфігурації.

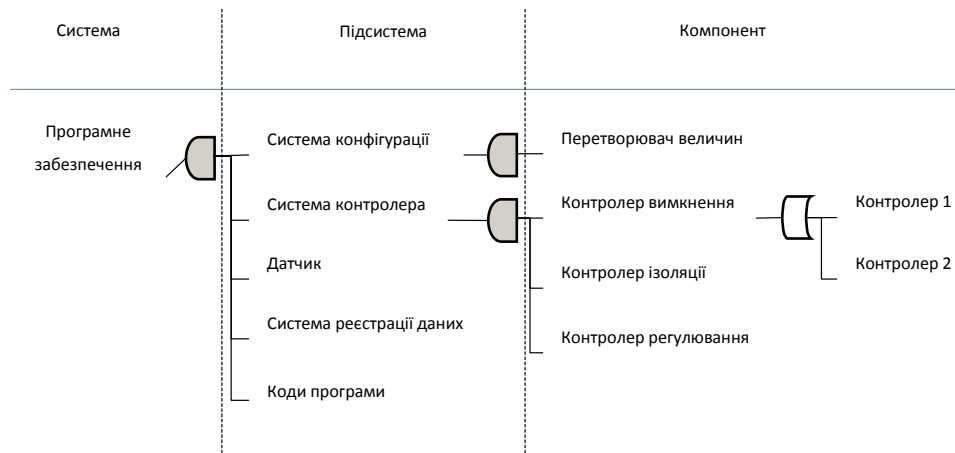


Рис. 1.21 - Структурна ієрархія програмного забезпечення у DP-системі

Як показано на рисунку, підсистема конфігурації має компонент перетворення величин. Система контролера складається з компонентів: контролера вимкнення, ізоляції та регулювання. Датчик може складатися з декількох компонентів, таких як датчики тиску та температури. Представлена структурна ієрархія може бути скоригована для різних типів програмного забезпечення залежно від рамок системи та програмного забезпечення [60, 61].

На рисунку 1.22 представлений приклад переходів між станами програмного забезпечення та його середовища (станами оператора та апаратних систем). Діаграма переходів станів для досліджуваного програмного забезпечення повинна бути розроблена залежно від застосування та робочого процесу програмного забезпечення.

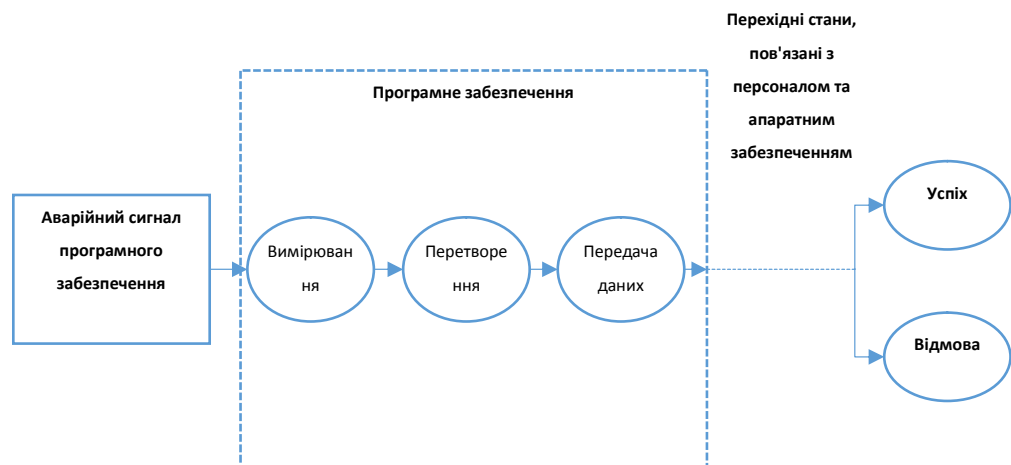


Рис. 1.22 - Діаграма переходів станів ПЗ у DP-середовищі

Перший стан - це аварійний сигнал програмного забезпечення. Це може бути помилковий сигнал; таким чином, ця подія має ймовірність точності (у нас також може бути збій програмного забезпечення без будь-якої тривоги, що тут не відображено). Наступні стани розробляються відповідно до матриці компонентів-функцій, а останні стани є кінцевими станами, які на цій діаграмі позначені як успіх і відмова. Кінцеві стани повинні бути визначені на основі застосування, рамок системи та мети дослідження. Наприклад, тут «успіх» вказує на справне функціонування програмного забезпечення та задіяних компонентів, представлений на діаграмі переходів станів (не всієї системи) [62, 63].

При моделюванні відмов програмного забезпечення в системах DP важливо враховувати не лише факт збою, а й послідовність активації функціональних модулів, яка може призвести до аварійного сценарію. Наприклад, помилкове значення з датчика, що не було виявлене своєчасно, може активувати помилкову логіку в обробці даних, змусити систему змінити положення судна або проігнорувати реальну загрозу. Саме така послідовна активація помилкових функцій представлена у вигляді логічної моделі на рисунку 1.23.

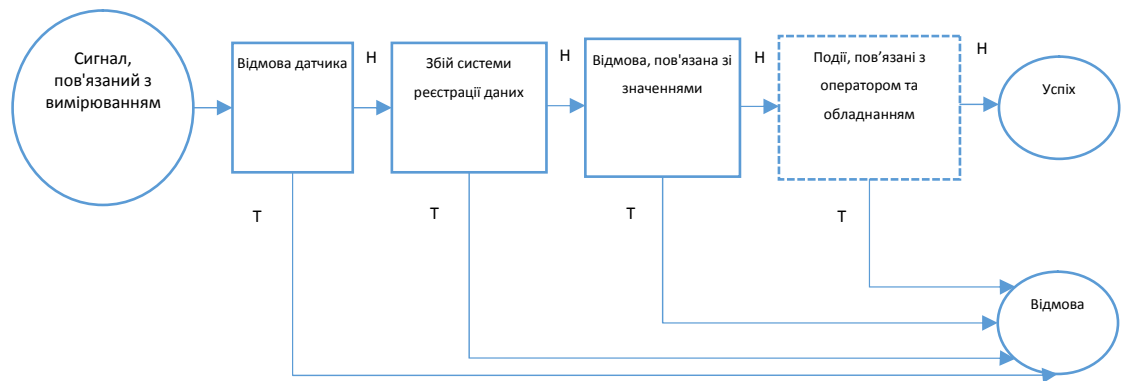


Рис. 1.23 - Діаграма сценарію послідовності помилок програмного забезпечення

Модель показує зв'язки між збоями датчика, неправильними значеннями, логікою ПЗ та кінцевими відмовами системи. Це приклад того, як події типу "невірне значення сенсора" перетворюються в логічні моделі із виявленням конкретної несправної функції, пов'язаної з кодом або структурою ПЗ.

З метою інтеграції всіх компонентів ризику: технічних, людських, програмних та зовнішніх факторів, була побудована концептуальна модель онлайн-оцінки ризиків, що поєднує усі джерела даних і реакцій.

Модель є розвитком ідей симуляторів типу ADS (Accident Dynamic Simulator), які використовуються в енергетиці та адаптовані для морських DP-систем та враховує контекст дій оператора, логіку ПЗ, середовище і забезпечує основу для динамічного моделювання ризиків у реальному часі, див. рис. 1.24 [64, 65].

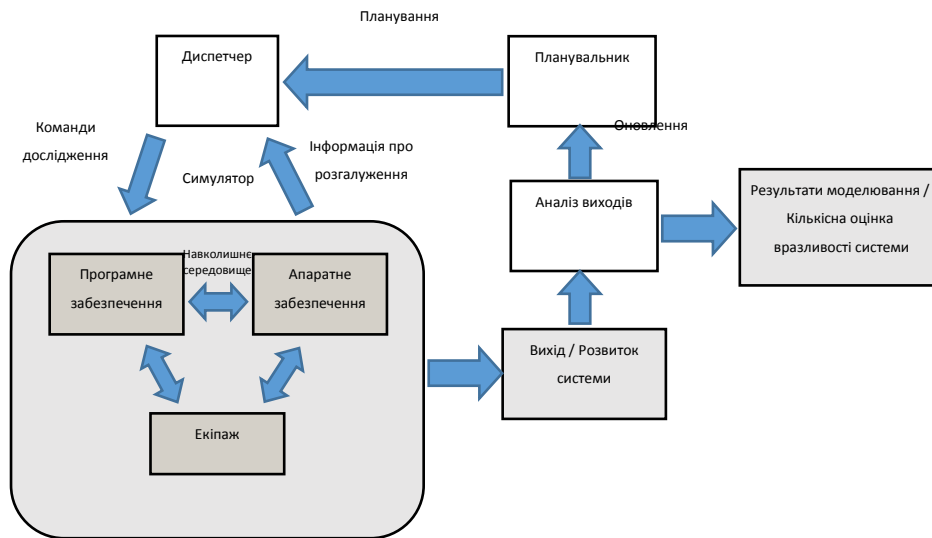


Рис. 1.24 - Концептуальна модель ADS для онлайн-оцінки ризиків

Узагальнена схема демонструє взаємодію ПЗ, людини, апаратної частини й середовища в рамках моделі DPRA з елементами планування аварійних сценаріїв. Модель побудована як динамічний симулятор враховує не лише технічні або людські помилки, а й зміни навколишнього середовища. Такий підхід реалізований в ADS, і тут адаптований під DP-системи.

На відміну від апаратних відмов, які часто мають чіткий механізм і фіксуються фізичними параметрами (струм, тиск, напруга), помилки програмного забезпечення можуть бути латентними, складно діагностованими і тривалий час не проявлятися. У DP-системах такі збої особливо критичні, оскільки ПЗ контролює логіку поведінки судна, розрахунок позиції, баланс навантаження, спрацювання аварійної автоматики, тощо [66, 67].

Збої ПЗ є не менш критичним джерелом ризику, ніж апаратні відмови. Особливо небезпечними є ті, що не проявляються одразу (латентні дефекти) або активуються лише при рідкісному збігу обставин. Саме тому моделі DPRA мають включати елементи оцінки надійності ПЗ, перевірки логіки та відслідковування сценаріїв переходів станів у реальному часі [68, 69].

У таблиці 1.7 систематизовано основні категорії причин, які призводять до відмов або небажаної поведінки ПЗ, а також проаналізовано їх типові наслідки для роботи системи динамічного позиціонування.

Таблиця 1.7 - Причини збоїв програмного забезпечення у системах динамічного позиціонування

№	Категорія причини	Характеристика прояву	Типові наслідки
1	Некоректна логіка ПЗ	Алгоритми прийняття рішень не охоплюють рідкісні сценарії	Невірне позиціонування, затримка дій
2	Взаємодія з некоректними даними	Ввід "брудних" або невалідних даних із сенсорів або користувача	Нестабільна поведінка, помилкове рішення
3	Системна двозначність інтерфейсу	GUI не інформує про істинний стан або дублює сигнали	Пропущені тривоги, неправильна реакція DPO
4	Збої в оновленнях та версіях	Неперевірені оновлення змінюють поведінку окремих модулів	Поява нових помилок після модернізації системи
5	Невизначені переходи станів	В ПЗ не передбачено обробку переходу між режимами або збоїв	Зависання, самостійний "перезапуск" логіки
6	Людський фактор при програмуванні	Помилки в логіці, документації, конфігурації	Закладені помилки ще на етапі інженерії

Джерело: Упорядковано за матеріалами CREAM, NASA PRA, власний досвід DP-проектів

У складних інтегрованих системах, таких як системи динамічного позиціонування (DP), збої рідко є ізольованими. Навпаки, часто спостерігається ефект каскадних відмов, коли один збій призводить до перевантаження інших підсистем, викликаючи подальші відмови. Такий ефект може бути ініційований як апаратним дефектом, помилкою програмного забезпечення, так і некоректною дією оператора. Відмова одного модуля призводить до необхідності компенсації іншими, що викликає зростання навантаження і, зрештою, «ефект доміно», який розповсюджується по всій системі.

Особливо небезпечними є латентні логічні взаємозв'язки, які не враховані в початковому проектуванні, але активуються у кризових ситуаціях [70, 71].

Представлена схема на рисунку 1.25 демонструє типовий сценарій розвитку каскадної відмови у складній морській системі, зокрема в DP-середовищі. Вихідним тригером може бути відмова апаратного компонента, збій ПЗ або людська помилка, що призводить до початкової системної аномалії.

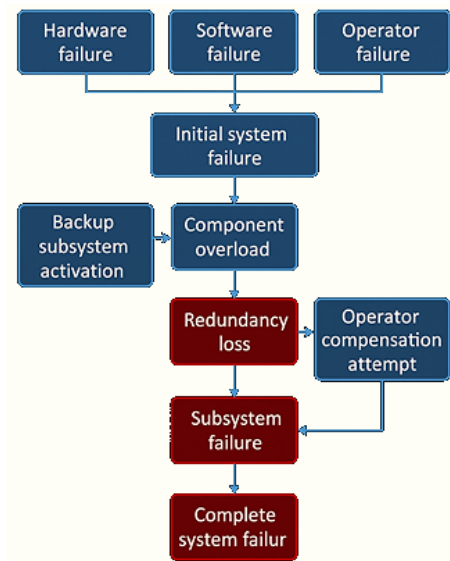


Рис. 1.25 - Сценарій каскадної відмови у DP-системі

Подальше перевантаження компонентів, активація резервів та зниження рівня надмірності (redundancy loss) створюють умови для наступного етапу відмови підсистеми, яку оператор, як правило, намагається компенсувати. У випадку неуспіху компенсуючої дії відбувається прогресування відмови до повної втрати керованості або повного системного збою. Цей сценарій відображає ефект доміно й підкреслює необхідність моделювання таких ланцюгів у динамічних ризик-аналізах типу DPRA [72, 73].

Аналіз технічної, програмної і людської взаємодії у системах динамічного позиціонування (DP) засвідчує їхню нерозривну взаємозалежність, де збій одного компонента здатен ініціювати ланцюг системних реакцій. Найбільш

уразливими виявилися ділянки з високою інтеграцією ПЗ і сенсорної логіки, обмеженою прозорістю інтерфейсів для DPO, а також відсутністю вбудованих механізмів запобігання каскадним сценаріям. Помилки оператора у реальних умовах переважно є наслідком багатofакторного тиску, а не лише когнітивної недосконалості, що вимагає включення моделей типу CREAM, SPAR-H, ATHEANA до оцінки ризиків.

1.4 Методи аналізу людського фактору у DP-системах: CREAM, SPAR-H, ATHEANA

У сучасних системах динамічного позиціонування (DP) людський фактор залишається критично важливою змінною, що впливає на безпеку операцій. Оцінка впливу помилок оператора (DPO) передбачає врахування не лише когнітивного навантаження, а й контекстуальних умов: стресу, часу, доступної інформації, досвіду, підготовки. У цьому контексті набули поширення методики кількісного аналізу людської надійності, зокрема:

- CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method). Орієнтований на ідентифікацію когнітивного режиму дій оператора (стратегічний, тактичний, розпізнавальний, випадковий). Оцінює вплив контекстуальних умов на ймовірність помилки [74]. Створено з урахуванням взаємодії між завданням, середовищем і когнітивною моделлю людини;

- SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Analysis). Розділяє помилки на дві основні групи: діагностичні (виявлення проблеми) та виконавчі (реакція на проблему). Оцінює їх через множники впливу (Performance Shaping Factors, PSF), такі як доступний час, стрес, складність завдання, тощо. Метод пропонує таблиці множників і алгоритм розрахунку ймовірності людської помилки (HEP) [75];

- ATHEANA (A Technique for Human Event Analysis). Поєднує традиційний PRA-аналіз із якісною ідентифікацією людських помилок. Орієнтована на виявлення помилок у сценаріях з високим ризиком та інтегрується в дерева подій PRA. Метод націлений на аналіз відхилень від нормальної поведінки оператора та їхніх причин [76].

У Таблиці 1.5 наведено порівняльний аналіз трьох основних методів оцінки людського фактору, що застосовуються у критичних системах управління, зокрема у морських DP-операціях.

Таблиця 1.8 - Порівняння методів аналізу людського фактору

Критерій	CREAM	SPAR-H	ATHEANA
Тип підходу	Когнітивний, контекстуальний	Ймовірнісний, мультиплікативний	Якісно-кількісний, PRA-інтегрований
Основні чинники	Режими управління, контекст	PSF: час, стрес, складність, підготовка	Причини і наслідки помилок, сценарії
Застосування в DP	Аналіз когнітивної адаптації DPO	Кількісна оцінка ризику дій DPO	Аналіз відхилень у нестандартних ситуаціях
Глибина деталізації	Середня	Висока	Висока
Вимоги до даних	Середні	Високі (PSF, статистика)	Високі (аналітика сценаріїв)

Аналіз показує, що SPAR-H найбільш придатний для кількісної оцінки ймовірності помилок оператора в реальному часі, у той час як CREAM фокусується на когнітивній оцінці умов прийняття рішення, а ATHEANA на сценарному аналізі аварійного розвитку подій. У контексті систем DP найбільш ефективним є поєднання цих підходів, де SPAR-H забезпечує обчислюваність, CREAM - адаптивність, а ATHEANA - сценарну обґрунтованість.

На рисунку 1.26 представлено узагальнену структуру динамічної байєсової мережі, побудованої на основі методології SPAR-H.

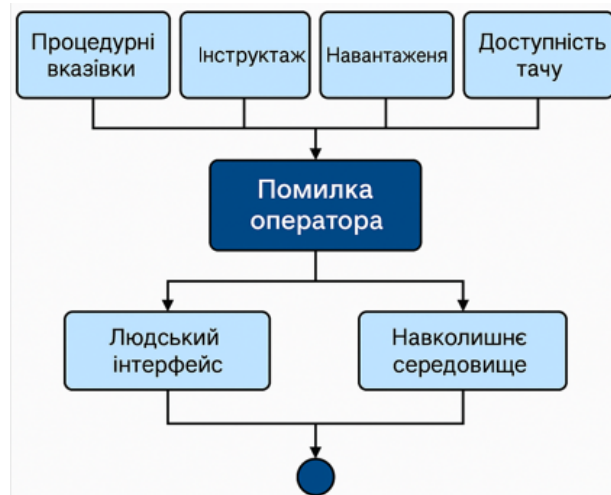


Рис. 1.26 - Байєсова мережа SPAR-H для оцінки помилок DPO

Кожен вузол мережі відповідає одному з множників впливу (PSF): доступний час, стрес, зорове навантаження, складність завдання, підготовка оператора, які впливають на ймовірність помилки при діагностиці (Diagnosis Error) та виконанні дій (Action Error).

Зв'язки між вузлами відображають причинно-наслідкові залежності, а вихідна ймовірність обчислюється через правила Байєса, що дає змогу адаптувати ризик-профіль у режимі реального часу залежно від змін операційного середовища [77, 78].

Проведений аналіз методів врахування людського фактору в оцінці ризиків (CREAM, SPAR-H, ATHEANA) показав, що хоча існують інструменти для кількісного та якісного моделювання помилок оператора, їх інтеграція в систему прийняття рішень у режимі реального часу залишається обмеженою. Окремо було продемонстровано, що традиційні підходи до оцінки ризиків (зокрема PRA) не здатні ефективно моделювати часову еволюцію подій, неповноту даних, багатфакторні сценарії взаємодії технічних і поведінкових компонентів системи [79, 80].

У контексті сучасних вимог до безпеки систем динамічного позиціонування, що працюють в умовах нестабільного зовнішнього середовища

і високої залежності від дій оператора, постає потреба у докорінному переосмисленні підходів до оцінки ризиків. З огляду на це, параграф 1.5 буде присвячено аналізу типових проблем онлайн-оцінки ризиків, що виникають у DP-системах, а також обґрунтуванню вимог до нової моделі а саме динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA).

1.5 Типові проблеми онлайн-оцінки ризиків у DP-системах

Попри наявність класичних підходів до оцінки безпеки, їхнє використання в режимі реального часу у системах динамічного позиціонування (DP) нашоєхується на низку критичних проблем. Онлайн-оцінка ризиків вимагає не тільки швидкості обчислень, а й адаптивності, здатності враховувати багатфакторну природу інцидентів і постійно змінні операційні умови. Відповідно, традиційні методи PRA демонструють низьку ефективність у цих умовах, а отже потребують модифікації або заміни на DPRA (Dynamic Probabilistic Risk Assessment) [81, 82].

Ключові виклики реалізації онлайн-оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування (DP):

1. Обмежена оперативність традиційних методів PRA. Методи кількісного оцінювання ризиків, такі як Probabilistic Risk Assessment (PRA), характеризуються значною складністю побудови подійних дерев і сценаріїв відмов, що перешкоджає їх застосуванню для оперативного реагування в умовах швидкозмінної аварійної ситуації.

2. Інформаційна неповнота та невизначеність вхідних даних. Дані, що надходять з сенсорів, НМІ, логів та інших джерел, можуть бути неповними, зашумленими або надходити із затримкою. Це суттєво впливає на точність та своєчасність оцінки поточного рівня ризику.

3. Складність урахування людського фактору в реальному часі. Динамічні зміни у психофізіологічному стані оператора DP-системи (в тому, когнітивне навантаження, рівень стресу тощо) не підлягають прямому вимірюванню або прогнозуванню, що ускладнює інтеграцію цих аспектів у загальну модель ризику.

4. Неврахування часової еволюції подій. Більшість традиційних моделей оцінки ризику розраховані на статичні умови. Вони не мають адаптивних механізмів оновлення оцінки при зміні зовнішніх факторів (наприклад, погодних умов або технічного стану обладнання).

5. Відсутність уніфікованої архітектури збору та обробки даних. Інформація про стан системи надходить з різномірних джерел, часто не синхронізованих між собою, що ускладнює її цілісну інтеграцію в систему підтримки рішень.

6. Недостатній рівень автоматизації підтримки рішень. Багато сучасних DP-систем надмірно покладаються на суб'єктивну оцінку оператора, замість того щоб використовувати алгоритми автоматичного аналізу та попередження про зміну ризиків.

Актуальність створення DPRA-підходу полягає в тому що перераховані обмеження зумовлюють необхідність розробки нової концепції - Dynamic Probabilistic Risk Assessment (DPRA).

Цей підхід передбачає врахування часової динаміки, взаємозв'язку сценаріїв розвитку подій та багаторівневої взаємодії між технічними компонентами, операторськими діями та зовнішніми умовами [83-85].

Таким чином, за результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що традиційні методи імовірнісної оцінки ризиків (PRA), незважаючи на широке застосування у ядерній енергетиці, морській інженерії та інших суміжних сферах, виявляють низьку ефективність при використанні в реальному часі. Зокрема, вони мають обмеження щодо гнучкої обробки

гетерогенних даних, своєчасного оновлення оцінок та урахування поведінкових (людинамашинних) чинників. Такі обмеження обґрунтовують доцільність розробки та впровадження нового методологічного підходу, динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA). Загалом такий підхід передбачає сценарно-орієнтовану, адаптивну та часово-чутливу модель оцінки, яка враховує як технічні параметри, так і змінні поведінкові характеристики операторів, з інтеграцією даних із різномірних джерел у реальному часі [86-88].

Узагальнюючи результати теоретичного аналізу, можна стверджувати, що ефективне управління ризиками у системах динамічного позиціонування потребує переходу від традиційних підходів до динамічної, інтегрованої, поведінково чутливої моделі оцінки ризиків (DPRA). Запропонований підхід поєднує у собі математичну модель розвитку подій у часі, обробку сенсорних та когнітивних даних, а також алгоритмічну підтримку прийняття рішень оператором.

Порівняльна характеристика традиційної PRA та підходу DPRA наведена в таблиці 1.9, що узагальнює їхні ключові властивості, функціональні відмінності та релевантність до вимог сучасних систем динамічного позиціонування (DP).

Таблиця 1.9 - Порівняння характеристик моделей PRA та DPRA у контексті систем динамічного позиціонування

Критерій	Класична PRA	DPRA (динамічна оцінка ризиків)
Урахування часу	Переважно статичний підхід	Часова еволюція подій
Робота з неповними даними	Обмежена	Можливість оновлення на основі вхідних потоків
Інтеграція людського фактору	Обмежено, вручну	Динамічна оцінка через HRA-моделі (SPAR-H, CREAM)
Автоматизація	Низький рівень	Високий рівень автоматизованого реагування

Джерела даних	Переважно інцидентна статистика	Сенсори, логі, HMI, симулятори
Реакція на зміну умов	Вручну або із затримкою	Автоматичне оновлення моделей ризику
Придатність для DP-систем	Часткова	Повна відповідність вимогам сучасних DP-систем

Для забезпечення цілісного впровадження DPRA в рамках дисертаційного дослідження, реалізовано структурно-логічну технологічну карту, яка відображає зв'язок між науковою проблемою, метою, завданнями, методами, новизною та очікуваними результатами роботи.

1.6 Формулювання завдань та технологічна карта дослідження

На основі проведеного аналізу теоретичних засад оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування, виявлених обмежень існуючих моделей та систематизації факторів ризику було визначено наукову позицію, яка лежить в основі побудови системи DPRA.

У зв'язку з цим доцільним є узагальнення ключових елементів дослідження у вигляді технологічної карти, яка відображає основні цілі, завдання, об'єкт, предмет, наукову новизну та практичну значущість результатів, яка дозволяє логічно структурувати дослідження та визначити орієнтири для реалізації наступних етапів роботи.

У таблиці 1.10 представлено структурно-логічну схему дослідження, що відображає послідовність переходу від теоретичного аналізу до прикладної реалізації методів оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування суден. Зокрема, наукова проблема сформульована як нестача ефективних інструментів для онлайн-оцінки ризиків, що враховують динаміку зміни станів, технічні та людські відмови, а також зовнішні фактори (вітер, течія, збурення). У межах поставленої мети а саме підвищення безпеки DP-операцій,

запропоновано новий метод DPRA, побудовано математичні та логічні моделі, а також розроблено структурну архітектуру, що реалізує дані принципи на практиці.

Таблиця 1.10 - Структурно-логічна схема дослідження

№	Елемент	Формулювання
1	Тема дослідження	Розробка методу оперативної оцінки безпеки операцій динамічного позиціонування суден
2	Наукова проблема	Відсутність ефективних онлайн-інструментів для оцінки ризиків з урахуванням часу, ПЗ та дій оператора
3	Мета дослідження	Підвищення безпеки DP-систем за рахунок впровадження DPRA, здатної працювати в реальному часі
4	Гіпотеза дослідження	Якщо оцінку ризиків реалізувати як DPRA, що враховує поведінку оператора, стан системи та зміни середовища, це дозволить зменшити ймовірність критичних інцидентів
5	Об'єкти дослідження	Процеси позиціонування суден офшорного флоту, інші судна, обладнані системами динамічного позиціонування
6	Предмет дослідження	Алгоритми, структури даних та логіка оцінки ризиків у DP-системах
7	Завдання дослідження	Формалізувати фактори ризику; створити математичні моделі; розробити архітектуру DPRA; побудувати алгоритми прийняття рішень; провести моделювання та аналіз реалізації
8	Методи дослідження	Імовірнісний аналіз, моделювання у MATLAB/Simulink, дерева подій, динамічні байєсові мережі, SPAR-H
9	Наукова новизна	DPRA-методика з урахуванням часової еволюції, поєднання технічних відмов, людських помилок і зовнішніх факторів у реальному часі
10	Практичне значення	Можливість впровадження у DP-тренажери, системи підтримки рішень для операторів, у автономні платформи і інші.
11	Очікувані результати	Реалізована адаптивна DPRA-система з моделюванням ризиків, підтримкою рішень та сценарним прогнозом

Технологічна карта на рисунку 1.26 також відображає зв'язок між завданнями дослідження та структурою дисертаційної роботи, що дозволяє чітко прослідкувати, які елементи реалізуються в кожному з розділів.

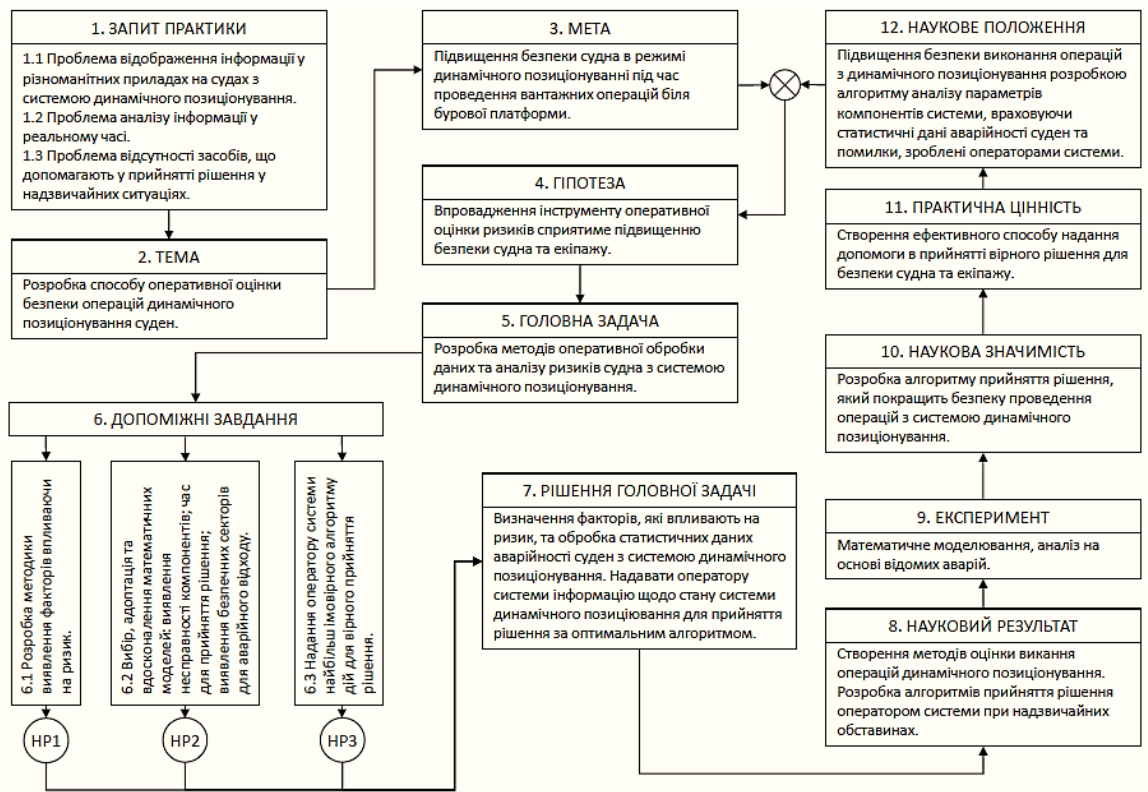


Рис. 1.26 - Технологічна карта дослідження

Проведений у Розділі 1 аналіз теоретичних основ оцінки ризиків, виявлені обмеження існуючих моделей PRA, дослідження особливостей поведінки DP-систем у кризових режимах та інтеграція факторів людської, технічної та середовищної природи дозволяє сформулювати наступні завдання для подальших етапів дослідження:

- розробити математичний апарат динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA), який дозволяє моделювати часову еволюцію ризику, враховуючи як технічні збої, так і поведінкові реакції оператора в умовах змінного середовища;
- сформулювати інтегровану архітектуру обробки потоків даних для систем динамічного позиціонування, яка забезпечує безперервне оновлення інформації з сенсорів, тренажерних сценаріїв і оцінки стану оператора;

- побудувати моделі дерев відмов і сценаріїв аварійних режимів, що базуються на структурі IMCA та дозволяють динамічну реконфігурацію логіки реагування відповідно до DPRA;
- інтегрувати у DPRA-алгоритми моделі людського фактору (CREAM, SPAR-H, ATHEANA), з використанням динамічних байєсових мереж для оцінки ймовірностей помилок оператора в реальному часі;
- розробити математичну модель руху судна в DP-режимі, що включає параболічні регулятори з нечутливою зоною для компенсації впливу вітрових і течійних збурень;
- здійснити оцінку ефективності запропонованого методу, порівнявши DPRA з традиційними підходами за показниками точності, адаптивності, стійкості та енергоефективності на основі чисельного моделювання і практичних сценаріїв.

1.7 Висновки до першого розділу

У даному розділі проведено теоретичний аналіз проблематики оцінки ризиків у системах динамічного позиціонування суден. Розглянуто еволюцію архітектури DP-систем, типи відмов та сценарії інцидентів, обґрунтовано обмеження традиційних моделей PRA і актуальність переходу до динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA). Особливу увагу приділено впливу людського фактору, організаційним помилкам, а також взаємодії технічних компонентів із програмним забезпеченням у складних ситуаціях.

Сформульовано загальну архітектуру DPRA-системи та представлено її реалізацію у вигляді модульної структури, що включає елементи аналізу подій, надійності, працездатності та динамічного моделювання ризиків. Проаналізовано сучасні методології, серед яких IMCA, SPAR-H, CREAM та

ATHEANA, що застосовуються для ідентифікації імовірності помилок оператора.

На основі статистичних звітів ІМСА та практичного досвіду підтверджено доцільність створення інтегрованих моделей оцінки ризиків, які об'єднують технічні параметри, поведінкові реакції DPO та зовнішні змінні середовища. Встановлено перелік факторів ризику, що мають бути враховані в подальших розділах при побудові кількісних моделей, алгоритмів підтримки рішень і практичних систем DPRA.

1. Обґрунтовано актуальність оцінки ризиків у DP-системах, яка зумовлена необхідністю оперативного аналізу динаміки змін стану судна в умовах впливу технічних, людських і зовнішніх чинників.

2. Проаналізовано основні сценарії втрати позиції (Drive-off, Drift-off, Blackout) та фактори, що до них призводять, зокрема на основі статистики ІМСА та тренажерного моделювання.

3. Сформульовано вимоги до методів динамічної оцінки ризиків (DPRA), зокрема безперервність оновлення даних, урахування часової еволюції подій та інтеграція багатфакторного впливу.

4. Розкрито роль взаємодії оператора, ПЗ та апаратного середовища у виникненні інцидентів, ідентифіковано типові помилки DPO та механізми каскадних збоїв у системах.

5. Систематизовано сучасні методи оцінки людського фактору (CREAM, SPAR-H, ATHEANA) як основи для включення поведінкової складової у моделі DPRA.

6. Запропоновано підхід, що передбачає створення DPRA-моделі з урахуванням реального часу, динамічних сценаріїв та багатокомпонентного аналізу ризику.

Результати розділу опубліковані у [53, 172, 173].

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ РИЗИКІВ

2.1 Структура даних для реалізації динамічної оцінки ризиків (DPRA)

Одним з ключових елементів побудови системи динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA) є структура даних, яка повинна забезпечувати інтеграцію, оновлення та обробку багатофакторної інформації у режимі реального часу. На відміну від класичних моделей PRA, що ґрунтуються на попередньо зібраній статистиці інцидентів, DPRA вимагає потокового аналізу інформації з технічних, поведінкових і середовищних джерел, що постійно змінюються в процесі проведення морської операції.

Формування ефективної структури даних для DPRA базується на модульному принципі. Кожен модуль відповідає за окрему частину інформаційного потоку, що впливає на рівень ризику в конкретний момент часу. Така структура дозволяє адаптувати оцінку ризиків до актуальних умов, зберігаючи можливість масштабування та впровадження у різні конфігурації DP-систем.

Представлена структура даних дозволяє забезпечити системну підтримку оцінки ризиків в реальному часі. Завдяки модульній побудові DPRA-система здатна не лише фіксувати зміни параметрів, а й прогнозувати розвиток подій, адаптуючи поведінку алгоритмів залежно від ситуації. Це створює основу для інтеграції оцінки ризиків у систему підтримки прийняття рішень (DSS) та формування динамічного ризик-профілю судна, таблиця 2.1 [89, 90].

Таблиця 2.1 - Основні функціональні компоненти структури даних у системі DPRA

№	Компонент	Опис функцій
1	Блок сценаріїв (Event Scenarios)	Декомпозиція аварійних режимів (Drive-off, Drift-off, Blackout); інтеграція ймовірнісної логіки (дерева подій, байєсові мережі).
2	Сенсорна підсистема (Sensor Input)	Збір параметрів стану судна: позиція, курс, швидкість, сигнали систем керування, вітрові та течійні збурення.
3	Підсистема дій оператора (Operator Actions / HMI Layer)	Логування дій DPO: команди, затримки реагування, сигнали HMI, конфлікти в управлінні.
4	Історичні дані / база знань (Knowledge Base)	Акумуляція попередніх інцидентів, тренажерних сценаріїв, стандартів ІМСА, лог-файлів.
5	Модуль контекстної адаптації (Context Handler)	Налаштування параметрів моделі залежно від типу платформи, навігаційного режиму, досвіду оператора.

На рисунку 2.1 представлено логічну архітектуру модулів структури даних DPRA.

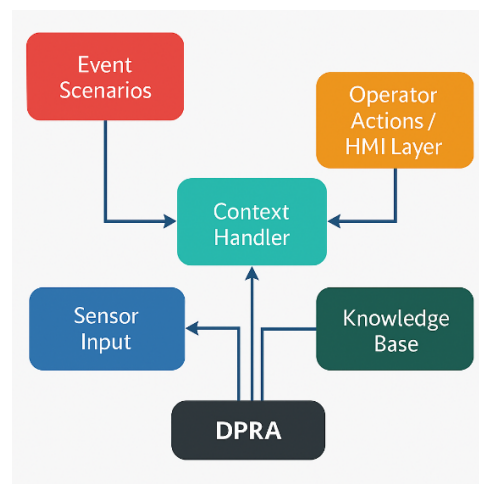


Рис. 2.1 - Модульна структура обробки даних у системі DPRA

Центральний елемент - модуль Context Handler, який виконує функції адаптації моделі до поточних умов та забезпечує взаємозв'язок між трьома основними потоками: сенсорними даними, діями оператора та історичними сценаріями/знаннями. Вхідним елементом виступає блок Event Scenarios, що ініціює оцінку ризику на основі розпізнавання типу аварійної ситуації. Така побудова дозволяє створити адаптивну і масштабовану структуру для реалізації DPRA у морських системах управління [91, 92].

Ефективність роботи системи DPRA визначається не лише її архітектурою, але й структурованістю та якістю вхідних даних. Для забезпечення стабільної роботи механізмів оцінки ризиків необхідно здійснювати чітку класифікацію інформаційних потоків. Залежно від джерела походження, функціонального навантаження та контексту застосування, дані поділяються на окремі категорії, кожна з яких обробляється за визначеними алгоритмами [93].

У процесі функціонування системи DPRA обробляються різноманітні за джерелом, форматом та значенням дані, які впливають на оцінку рівня ризику. Для забезпечення структурованого підходу до їх інтеграції та аналізу доцільним є поділ даних на групи за функціональним призначенням. Така класифікація дозволяє реалізувати модульність у побудові баз даних та ефективно організувати обмін інформацією між компонентами DP-системи [94].

Загалом усі дані, що використовуються у DPRA, умовно поділяються на середовищні, експлуатаційні, технічні, людські, організаційні та історичні/тренажерні. Кожна категорія має своє джерело походження та використовується різними підсистемами оцінки ризику (в тому числі сценарними модулями, контекстною адаптацією або алгоритмами прогнозування). Таку класифікацію представлено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Типи та джерела даних у системі DPRA

№	Тип даних	Приклади параметрів	Джерело
1	Середовищні	Вітер, течія, хвилювання	Метеостанції, датчики на борту
2	Експлуатаційні	Позиція, швидкість, курс	DP-системи, GNSS, інерційні системи
3	Технічні	Стани приводу, навантаження, споживання	Контролери систем, SCADA
4	Людські	Дії DPO, затримки, конфліктні команди	HMI-інтерфейс, лог-файли
5	Організаційні	Процедури, дозволи, режими роботи	Стандарти, інструкції, політики
6	Історичні/тренажерні	Минулі інциденти, симуляції	База знань, тренажери

Кожна із представлених у таблиці категорій даних має відповідну функцію у загальній структурі оцінки ризику. Для забезпечення ефективності роботи DPRA-системи, дані повинні зберігатися у вигляді структурованих масивів з доступом у реальному часі, що вимагає організації розподіленої бази даних, та включає окремі модулі для:

- поточних даних, що надходять від сенсорів, DP-контролера, HMI та інших бортових систем;
- історичних даних, зібраних у попередніх рейсах, аварійних ситуаціях та моделюваннях;
- симуляційних даних, що формуються під час тренажерних сесій або сценарного аналізу.

Так, відповідно до обраної архітектури, система має забезпечувати динамічне оновлення інформації в процесі виконання операції, що особливо важливо у ситуаціях, де часовий фактор відіграє критичну роль, наприклад, при зростанні навантаження, втраті датчиків або реакції оператора із затримкою [95, 96]. Таке багат шарове представлення даних дозволяє формувати динамічну

оцінку ризику, яка враховує як поточний стан системи, так і накопичений досвід аналогічних ситуацій.

На рисунку 2.2 представлено узагальнену схему потоків інформації у рамках системи DPRA. Дані надходять з розрізнених джерел, сенсори, НМІ, SCADA, база знань, і агрегуються у центрі обробки даних. Звідти вони передаються до модулів оцінки ризику, які реалізують обчислення з урахуванням вагових коефіцієнтів, часової динаміки та сценарної залежності. Така архітектура дозволяє формувати динамічний ризик-профіль судна, що оновлюється в режимі реального часу [97].

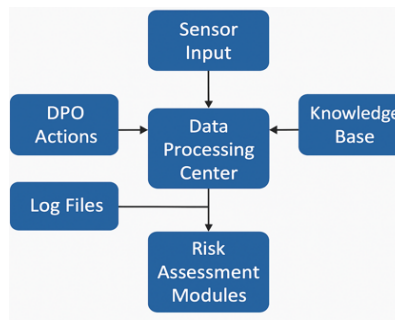


Рис. 2.2 - Потіки даних у системі DPRA

У DPRA важливо не просто отримати дані, а правильно структурувати їх за призначенням і часом. Уся інформація, з якою працює система, поділяється на три групи. Перша - це поточні дані, які надходять у реальному часі з сенсорів, НМІ та навігаційного обладнання. Вони використовуються для моментальної оцінки ситуації. Друга група - історичні дані: це логи, інформація про попередні інциденти, типові сценарії реагування. Вони формують базу для порівняння і коригування моделей. Третя - симуляційні, отримані з тренажерів або імітаційних платформ. Їх основне призначення це навчання системи й перевірка реакцій на змодельовані події. І як підсумок, щоб система залишалась актуальною, база знань регулярно оновлюється. Так само перераховуються ваги параметрів у моделі. Це дає змогу DPRA не «застигати» в статичному стані, а

адаптуватися до змін у середовищі, технічному стані систем або поведінці оператора [98].

Таким чином, сформовано структурну та функціональну основу для реалізації системи динамічної оцінки ризиків. Представлено класифікацію типів даних, принципи організації потоку інформації, структуру бази знань, що формує підґрунтя для побудови логічних схем ризику.

2.2 Дерева відмов у системах динамічного позиціонування

Одним з ключових інструментів моделювання ризиків у складних технічних системах є дерева відмов (Fault Trees), тобто логіко-структурні моделі, що дозволяють графічно відобразити причинно-наслідкові зв'язки між базовими відмовами елементів і критичними подіями верхнього рівня.

У контексті систем динамічного позиціонування (DP) дерева відмов дають змогу структуровано аналізувати сценарії розвитку інцидентів, враховуючи як технічні чинники, так і людські дії та зовнішні умови [99].

Дерева відмов у системах динамічного позиціонування є універсальним інструментом для опису механізмів розвитку аварійних ситуацій. Основна ідея методу полягає у побудові логічного дерева, де верхня подія (наприклад, втрата керування або позиції) обумовлена базовими подіями, що представляють конкретні відмови обладнання, програмного забезпечення або людські помилки [100].

На практиці дерева відмов дозволяють виконати структурний аналіз системи з виявленням критичних елементів, обчислити ймовірність розвитку аварії, а також сформувати основу для моделювання в системах DPRA.

Функції та призначення дерев відмов у контексті DP-систем узагальнено у Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Функції та застосування дерев відмов у DP-системах

№	Функція / призначення	Опис
1	Ідентифікація вузлів вразливості	Визначення елементів системи, з відмови яких починається розвиток аварійного сценарію.
2	Аналіз логіки розвитку інциденту	Побудова логічної структури від базових відмов до критичної події верхнього рівня.
3	Ймовірнісна оцінка верхньої події	Обчислення сумарної ймовірності настання інциденту на основі оцінки ймовірностей складових подій.
4	Формування структури вхідних даних для DPRA	Інтеграція дерева в модель динамічного аналізу ризиків із врахуванням часу, дій DPO та зовнішніх факторів.
5	Підтримка розробки заходів із зниження ризиків	Визначення критичних комбінацій відмов для підвищення надійності системи шляхом дублювання або резервування.

Як видно з таблиці, дерево відмов виконує не лише аналітичну функцію, а й слугує структурною основою для побудови динамічних моделей ризику. У системах DP особливу увагу приділяють технічним підсистемам (енергоживлення, позиціонування), які можуть запускати каскадну реакцію відмов. Дерево дозволяє моделювати ці зв'язки та виявляти вузли, резервування яких забезпечить суттєве зниження загального ризику. Це зумовлює потребу у представленні типового прикладу дерева відмов для DP-системи з ієрархією базових подій, що дозволить перейти до ймовірнісного розрахунку ризику в рамках моделі DPRA [101, 102].

На рисунку 2.3 представлено спрощене дерево відмов (Fault Tree), що моделює структуру причин, які можуть призвести до загального порушення роботи системи динамічного позиціонування (*DP Failure*).

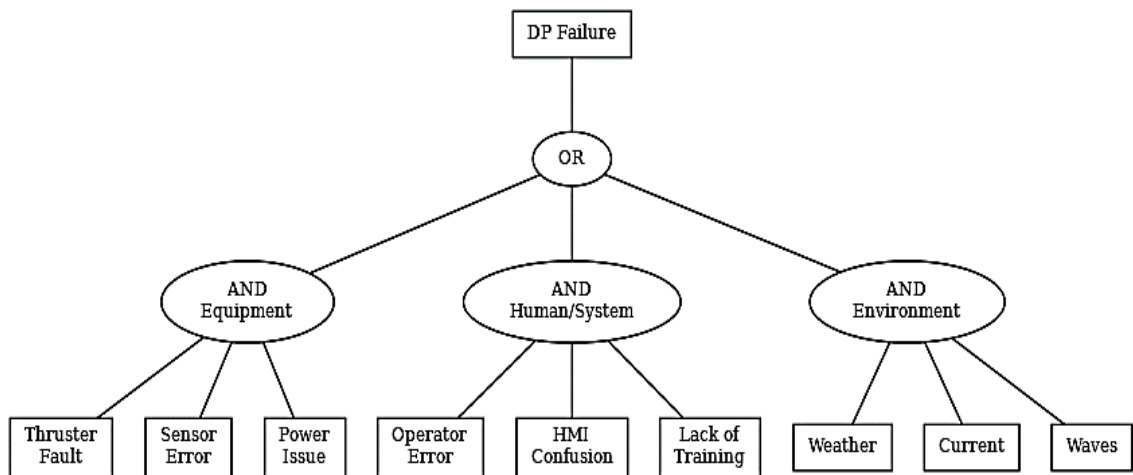


Рис. 2.3 - Типове дерево відмов у системі динамічного позиціонування

Верхня подія реалізується за логікою OR, тобто відмова може виникнути внаслідок одного з трьох основних блоків: технічного, людського або середовищного. У моделі DPRA верхня подія реалізується за логікою OR, тобто відмова системи може бути спричинена будь-яким із трьох основних блоків: технічним (Equipment), людським (Human/System) або середовищним (Environment).

Технічний блок (Equipment) працює за логікою AND - критична відмова виникає лише за умови комбінації щонайменше двох із трьох чинників: Thruster Fault (збій у роботі рушіїв), Sensor Error (помилка або втрата сигналу з датчиків позиціонування) та Power Issue (перебої в електроживленні або порушення резервного живлення). Якщо одночасно проявляються дві з цих проблем, система втрачає технічну стійкість.

Блок впливу людини (Human/System) також побудований на логіці AND і включає фактори, які виникають унаслідок взаємодії оператора з системою. Сюди входить Operator Error (некоректні або запізнілі дії DPO), HMI Confusion (неправильна інтерпретація даних на дисплеї або панелі керування) та Lack of Training (недостатній рівень підготовки персоналу для роботи в складних умовах).

Третій блок Environment описує вплив зовнішніх факторів. Логіка тут OR, тобто негативного впливу будь-якого з наведених факторів достатньо для зростання ризику, які представлено: Weather (погодні умови - вітер опади, обмежена видимість), Current (морські течії, і Waves - хвилювання).

Така структура дозволяє не лише відстежувати ключові шляхи формування ризик, але й закладати основи для побудови дерева подій та подальшого ймовірнісного аналізу. Наприклад, комбінація Sensor Error + Issue є тривним сценарієм, який може призвести до втрати позиції, особливо за складних погодних умов [103, 104].

Вищенаведений приклад дерева дозволяє не лише візуалізувати ймовірнісну логіку відмов, а й виявити ключові шляхи ризику, які варто контролювати засобами DPRA. Наприклад, можна створити модель для прогнозування комбінацій «Sensor Error + Power Issue», що з високою ймовірністю веде до втрати позиції.

Для побудови дерева відмов необхідним етапом є ідентифікація базових подій, які можуть спричинити критичну відмову системи динамічного позиціонування. Базові події представляють елементарні порушення або збої окремих компонентів (технічних, програмних, людських чи середовищних), що не можуть бути далі декомпозовані у межах дерева.

Ці події є основою для ймовірнісної оцінки та повинні бути сформульовані таким чином, щоб відображати можливість їх автоматизованого моніторингу та врахування в динамічному контексті [105, 106].

Типову класифікацію основних базових подій для DP-систем наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Типові базові події для дерев відмов у DP-системах

№	Назва базової події	Категорія	Джерело/система	Потенційний наслідок
1	Thruster Fault	Технічна	Система рушіїв (THR)	Зменшення або втрата тяги
2	Sensor Error	Технічна	GNSS, MRU, Gyro, VRU	Втрата точності координат
3	Power Failure	Технічна	Енергетична система (UPS, GEN)	Вимкнення систем або перехід у аварійний режим
4	Operator Error	Людський фактор	DPO / HMI	Невірна команда, затримка реагування
5	HMI Misinterpretation	Людський фактор	Інтерфейс управління	Неправильна інтерпретація інформації
6	Lack of Training	Організаційна / людська	Кваліфікаційна система	Недостатній рівень навичок
7	Severe Weather	Середовищна	Метеодані, сенсори	Перевищення допустимих умов експлуатації
8	Current Surge	Середовищна	Гідрологічні умови	Втрата стійкості позиціонування
9	Wave Impact	Середовищна	Сенсорна система	Коливання корпусу, перевантаження систем

Представлені базові події охоплюють усі ключові підсистеми DP-судна та дозволяють охарактеризувати логіку розвитку інцидентів з урахуванням багатофакторної природи ризику. Їх подальша структуризація в дереві дає змогу розраховувати ймовірність верхньої події (наприклад, втрата позиції) та здійснювати сценарний аналіз з урахуванням часових інтервалів, трендів сенсорних даних і поведінки оператора [107, 108].

Таким чином, використання дерева відмов дозволяє системно структурувати причинно-наслідкові зв'язки між вихідними подіями у підсистемах динамічного позиціонування та глобальними наслідками, від втраченого контролю до повної відмови системи. У процесі побудови дерева ідентифіковано основні базові події, що охоплюють технічні, людські та середовищні компоненти, а також визначено логіку їх взаємодії через AND/OR-вузли.

Сформована структура дерева виконує дві ключові функції:

- по-перше, виступає інструментом якісного аналізу вразливих елементів системи;
- по-друге, формує базу для подальшого кількісного ймовірнісного аналізу в рамках моделі DPRA.

Наступним кроком стане побудова математичних моделей динаміки судна та його систем управління, що дозволить здійснити інтеграцію фізичних параметрів руху з ризик-орієнтованим аналізом та реалізувати адаптивну оцінку ризиків у реальному часі [109, 110].

2.3 Математичне моделювання буксиру з азимутальним приводом (ASD) у складі DP-систем

У задачах динамічного позиціонування (DP) суден особливої важливості набуває врахування специфіки маневрування допоміжних плавзасобів, передусім буксирів типу Azimuth Stern Drive (ASD). Ці платформи з азимутальними рушіями відіграють ключову роль у процесах швартування, керованого буксирування і стабілізації курсу, особливо для суден великої водотоннажності. Врахування остійкості буксира та нелінійної динаміки буксирного троса є критичним для забезпечення безпеки операцій DP-систем. Запропонована модель має 4 ступені свободи (4-DOF) і враховує повну взаємодію між буксиром, тросом і буксированим судном у змінних гідродинамічних умовах.

У сучасній морській інженерії особливу увагу приділено розвитку допоміжного флоту, зокрема буксирів, що забезпечують безпечне маневрування, швартування та динамічне позиціонування великотоннажних суден. У відповідь на зростаючі розміри та інерційність комерційного флоту, особливо у класах ULCS (Ultra Large Container Ship), конструктори та

дослідники шукають рішення, здатні забезпечити високу маневреність та остійкість у стиснених умовах - таких, як акваторії портів, канали та вузькі фарватери. Одним із найефективніших рішень у цій сфері став буксир з азимутальним кормовим приводом (Azimuth Stern Drive, ASD) [111, 112].

ASD-буксири конструктивно оснащені рушіями, які можуть повертатися на 360° , забезпечуючи максимальну гнучкість керування. Здатність таких рушіїв змінювати вектор тяги в реальному часі суттєво підвищує ефективність як у режимі тяги, так і у режимі супроводу судна. Це дозволяє буксиру виконувати складні маневри з високою точністю при роботі у тісному контакті з великими суднами.

Проте, ефективна реалізація можливостей ASD-буксирів пов'язана з рядом викликів, які обумовлюють необхідність глибокого математичного аналізу. У першу чергу йдеться про динамічну остійкість буксира, яка може порушуватися при різких змінах напрямку зусиль рушіїв або при діях з боку буксирного троса. Зокрема, явище «гиртингу» (girting), тобто ситуації, коли боковий натяг троса стає критичним та може призвести до швидкого крену і втрати остійності, що потенційно призводить до аварій або навіть до перекидання судна [113, 114].

У науковій літературі представлені різноманітні підходи до математичного моделювання буксирів, які умовно можна поділити на два напрямки:

- моделі руху у площині (2-DOF або 3-DOF), які зосереджені на описі переміщення буксира без урахування вертикальних моментів або остійності;
- моделі з урахуванням остійності (4-DOF або 6-DOF), які включають не лише поступальний і обертальний рух у горизонтальній площині, але й коливання по крену або тангажу.

У контексті ASD-буксирів найбільш доречними є 4-DOF моделі, що включають опис крену, оскільки саме цей ступінь свободи є критичним для оцінки аварійних сценаріїв при роботі з буксирним тросом.

Дослідження П'яджо, Ікеди, Кіджіми та Йошімури охоплюють широкий період від класичних моделей надійності до сучасних підходів до оцінки ризиків у складних технічних системах розвинули методики оцінки маневреності буксирів із використанням гідродинамічних експериментів (EFD) та чисельного моделювання (CFD). У роботах [115-119] реалізовано багаторівневу валідацію моделей на масштабних та повномасштабних експериментах, що дало змогу визначити ключові параметри остійкості і тяги у складних режимах.

Разом з тим, значна частина досліджень або обмежується лише оцінкою сил рушіїв без урахування моментів остійкості наприклад, [120-124], або не включає повної динаміки буксирного троса як активного компонента системи «буксир-судно». Це суттєво обмежує практичну застосовність таких моделей у режимах підтягування або обв'язки, які найчастіше зустрічаються у реальних умовах портової навігації.

Таким чином, актуальною науковою задачею залишається розробка уніфікованої математичної моделі ASD-буксира, яка:

- враховує як маневрені, так і остійності характеристики буксира;
- включає вплив тяги рушіїв, їх орієнтацію та режим роботи;
- описує натяг троса з урахуванням точки прикладання сили, напрямку дії та можливості його миттєвого розриву;
- дозволяє моделювати критичні режими, в яких остійність порушується, наприклад, у випадках гиртингу або при різкій зміні вектору тяги.

Критичні фактори остійності буксира полягають в тому, що остійність буксира, на відміну від великотоннажного судна, має специфічну динаміку, яка зумовлена його малими розмірами, малою інерційною масою і високою

маневреністю. У реальних операціях, особливо при роботі в портах або під час динамічного позиціонування (DP), остійність буксира піддається впливу одразу кількох чинників, зокрема:

- гідродинамічні сили на корпусі;
- крутні моменти від рушіїв;
- сили натягу троса, які можуть спричинити перекидання;
- режим керування (синхронний/асинхронний) азимутальними рушіями;
- кренячі моменти, що виникають через непропорційний розподіл навантаження.

На міжнародному рівні не існує уніфікованих вимог до остійності буксирів, особливо малого і середнього тоннажу. Деякі національні або класифікаційні вимоги регламентують лише основні параметри стабільності у спокійних умовах, не враховуючи динамічні навантаження на буксир з боку троса або рушіїв. Зокрема, у більшості існуючих моделей не враховується миттєвий кренячий момент, спричинений гідродинамічним перекосом при маневруванні у зчепленні з іншим судном [125-128].

Крен судна може бути зумовлений низкою зовнішніх і внутрішніх силових впливів, які виникають під час буксирування, маневрування або взаємодії з іншими плавзасобами. Основні джерела крену доцільно систематизувати за характером дії, що дозволяє формалізувати ризики втрати остійності під час операцій у складних умовах. Найпоширеніші ситуації описані нижче:

1. Тяговий режим - виникає, коли буксирний трос прикладений у точці вище метацентра або несиметрично відносно площини діаметральної. Це створює момент у площині крену, що при значних навантаженнях може призвести до стійкого відхилення корпусу на борт.

2. Самопрокидування - комплексне явище, при якому одночасна дія бокового тягового зусилля троса, роботи гвинтів, положення керма та гідродинамічного тиску з боку хвилі формує перекидаючий момент. Такий сценарій небезпечний саме через мультифакторність і здатність швидко розвиватися без явного попередження.

3. Двобічна тяга при обв'язці виникає в ситуації, коли корпус піддається тиску з обох боків (наприклад, під час маневрування між суднами або швартування). При зміні симетрії або нерівномірному завантаженні це може призвести до втрати рівноваги.

Класифікація, яка представлена в таблиці 2.5 може використовуватись як основа для оцінки сценаріїв ризику при побудові моделей поведінки буксирів у небезпечних режимах.

Таблиця 2.5 - Механізми виникнення крену та їх вплив на остійність

Джерело крену	Опис дії
Тяговий режим	Дія троса, що тягне буксир назад із моментом у площині крену
Самопрокидування	Комбінований вплив троса, керма, гвинтів та бортових гідродинамічних сил
Двобічна тяга при обв'язці	Симетричний або асиметричний тиск з обох боків корпусу

На підставі аналізу даних морських розслідувань [129-131] можна виділити типові сценарії аварій, що найчастіше призводять до крену або повної втрати остійності буксира. Одним із найнебезпечніших є гиртинг - ситуація, коли трос тягне буксир боком, не залишаючи можливості маневрувати. Так через швидкий розвиток подій цей сценарій часто призводить до перекидання судна. Ще одним поширеним фактором є раптовий розрив буксирного троса, що викликає миттєву зміну балансу сил на корпусі та створює імпульсний момент крену.

Щодо потенційно критичних сценаріїв то слід додати втрату тяги або керованості, яка зазвичай виникає у разі відмови рушіїв або живлення систем управління, особливо у вузьких проходах небезпеку становить саме контакт із об'єктом, наприклад, із береговою інфраструктурою або іншим судном, що створює додатковий момент і може призвести до втрати остійності.

Особливо ризикованими ці ситуації стають у разі асиметричної роботи азимутальних рушіїв. Коли один з гвинтів дає тягу вперед, а інший працює на компенсацію дрейфу, виникає складний момент навантаження на корпус. За відсутності синхронного керування ця конфігурація може швидко призвести до крену навіть за стабільного зовнішнього середовища.

З технічної точки зору, момент крену при буксируванні визначається балансом між зовнішніми кренячими моментами (від троса, хвиль, об'єктів контакту) і внутрішнім відновлювальним моментом корпусу, що забезпечує остійність. Коли цей баланс порушується, а кут крену перевищує граничне значення, яке для ASD-буксирів зазвичай становить близько 60° тобто виникає незворотне опрокидування [132-135].

Наступним кроком є побудова динамічної математичної моделі руху буксира, яка повинна враховувати не лише вплив зовнішніх сил і моментів, а й внутрішні інерційні процеси, включаючи запізнення реакцій систем, перерозподіл мас, інерційні моменти корпусу та зміни у роботі рушіїв під дією складного хвильового поля.

У запропонованій моделі динаміки буксира типу Azimuth Stern Drive (ASD) враховано чотири ступені свободи - дві поступальні (u , v) та дві обертальні (p , r). Така модель дозволяє описати поведінку буксира як у вільному русі, так і в умовах дії натягнутого буксирного троса, що є принциповим для режимів DP.

Загальний вигляд системи рівнянь руху, яка описує комплексну динаміку буксиру, враховуючи додаткову масу та інерцію, що виникають при взаємодії з водою (ефект добавлених мас):

$$\begin{aligned}(m + m_{11})\dot{u} - (m + m_{22})vr &= X \\ (m + m_{22})\dot{v} + (m + m_{11})ur &= Y \\ (I_{44} + J_{44})\dot{p} &= K \\ (I_{66} + J_{66})\dot{r} &= N - x_G Y\end{aligned}, \quad (2.1)$$

де: m - маса буксиру; m_{ij} - додаткові маси по відповідних ступенях свободи; I_{ij}, J_{ij} - моменти інерції та додаткові моменти інерції, u, v - поступальні швидкості у поздовжньому та поперечному напрямках; p, r - кутові швидкості крену та рульового повороту; X, Y - результуючі гідродинамічні сили; K, N - результуючі моменти крену та повороту; x_G - відстань між центром мас і точкою прикладення бокової сили.

Модель тягових сил від азимутальних рушіїв. Сила, створена азимутальним рушієм, описується наступною формулою:

$$F_p = (1-t) \cdot \rho \cdot K_T(J, \theta_p) \cdot D^4 \cdot n |n|, \quad (2.2)$$

де: t - емпіричний коефіцієнт зниження тяги; ρ - щільність води; K_T - коефіцієнт тяги; функція ковзання J і кута нахилу θ_p ; D - діаметр гвинта; n - оберти гвинта.

Коефіцієнт ковзання:

$$J = \left| \frac{V_{UP}(1-w)}{nD} \right|, \quad (2.3)$$

де: V_{UP} - швидкість потоку на гвинті, w - зниження швидкості внаслідок корпусного опору.

Розкладання сил рушіїв у координатній площині. Тягові сили в системі координат судна мають вигляд:

$$\begin{aligned} X_P &= F_S \cos \delta_S + F_P \cos \delta_P \\ Y_P &= F_S \sin \delta_S + F_P \sin \delta_P \end{aligned} \quad (2.4)$$

де: F_S , F_P - сили від лівого та правого рушіїв; δ_S , δ_P - відповідні кути повороту рушіїв.

Моменти, створені рушіями:

$$\begin{aligned} K_P &= (z_P - z_G) \cdot Y_P \\ N_P &= x_P \cdot Y_P - y_S \cdot F_S \cos \delta_S - y_P \cdot F_P \cos \delta_P \end{aligned} \quad (2.5)$$

де: x_P , y_P , z_P - координати рушіїв; z_G - центр мас.

Врахування крену: рівняння остійності. Кренячий момент описується наступним рівнянням:

$$K_R = a_{42} \dot{v}_G - a_{46} \dot{r}_G - b_{46} r_G - b_{44v} p_G - K_\varphi, \quad (2.6)$$

де: a_{ij} , b_{ij} - коефіцієнти інерційних та демпфуючих сил; K_φ - відновлювальний момент:

$$K_\varphi = g \cdot m \cdot l(\varphi), \quad (2.7)$$

де: $l(\varphi)$ - плече остійності, що змінюється із кутом крену φ .

Вказане рівняння дозволяє враховувати крен, викликаний гідродинамічним тиском і моментами рушіїв, а також натягом троса у сценаріях обв'язки.

Валідне математичне описання натягу буксирного троса є критичним компонентом моделі взаємодії «буксир–судно», оскільки саме трос передає основну силу керованого впливу на об'єкт буксирування. В умовах динамічного позиціонування, а також при маневрах у тісних просторах (гавані, канали), натяг троса формує кренячий момент, змінює курс буксира і визначає зону ризику для остійності.

На відміну від класичних моделей, у даному підході:

- не враховується еластичність троса, натяг виникає миттєво при досягненні розрахункової довжини l_{TL} ;
- сила натягу F_T вважається рівною нулю, якщо відстань між точками кріплення на корпусах менша за l_{TL} .

При досягненні або перевищенні цієї межі виникає імпульсна передача сили, яка включає обидві компоненти - поступальну і обертальну.

Умови виникнення сили натягу. У моделі визначаються координати точок кріплення троса та порівнюються з розрахунковою довжиною:

$$\begin{aligned} F_T &= 0, & \text{якщо} & \quad d_{connect} < l_{TL} \\ F_T &> 0, & \text{якщо} & \quad d_{connect} \geq l_{TL} \end{aligned} \quad (2.8)$$

де: $d_{connect}$ - фактична відстань між точками кріплення.

Кінематичні корекції при натягу. Щоб уникнути розрахункової похибки розтягування троса при досягненні l_{TL} , вводиться кінематична поправка до швидкості буксира:

$$v'_x = v_x - \frac{d(l_{TL})}{dt}, \quad v'_y = v_y - \frac{d(l_{TL})}{dt} \cdot \sin \beta. \quad (2.9)$$

Це забезпечує миттєву корекцію імпульсу при передачі сили натягу на корпус буксира.

Результуюча сила натягу має розкладання на компоненти вздовж осей судна:

$$F_{PULL_X} = R_X \cdot \cos \beta_{PULL}, \quad F_{PULL_Y} = R_Y \cdot \sin \beta_{PULL}, \quad (2.10)$$

де: β_{PULL} - кут нахилу троса, R_X , R_Y - відповідні компоненти реакції.

Передача моментів від натягу троса. Момент крену, що виникає внаслідок натягу троса:

$$K_{PULL} = F_T \cdot (z_{PULL} - z_G), \quad (2.11)$$

де: z_{PULL} - висота точки кріплення троса; z_G - центр мас буксира.

У випадках асиметричної дії або декількох буксирів вводиться сума сил і моментів по всіх N точках:

$$\sum_{n=1}^N K_n = \sum F_{Tn} \cdot (z_{Tn} - z_G). \quad (2.12)$$

Врахування багатоточкового буксирування. Для систем, де декілька буксирів тягнуть судно, обчислюється векторна сума сил і моментів:

$$\begin{aligned}
 F_{X_total} &= \sum_{n=1}^N F_{PULL_Xn}, & F_{Y_total} &= \sum_{n=1}^N F_{PULL_Yn} \\
 K_{total} &= \sum_{n=1}^N F_{PULL_Yn} \cdot (z_{Tn} - z_G)
 \end{aligned}
 \quad . \quad (2.13)$$

Для ілюстрації просторових взаємодій у системі «буксир - буксироване судно» доцільно ввести узагальнену схему, яка описує геометричні та кінематичні параметри у трьох характерних режимах:

- тяга (режим підтягування);
- штовхання (контакт через корпус);
- обв'язка (перехід між режимами з критичним кутом крену).

У схемі на рисунку 2.4 центральним елементом є вектор натягу буксирного троса, що передає зусилля від буксира до судна. Він формує як поступальний імпульс на корпус судна, так і кренячий момент на сам буксир. У залежності від точки кріплення, довжини троса та кута відносного дрейфу визначається напрямок сили тяги та її компоненти по осях.

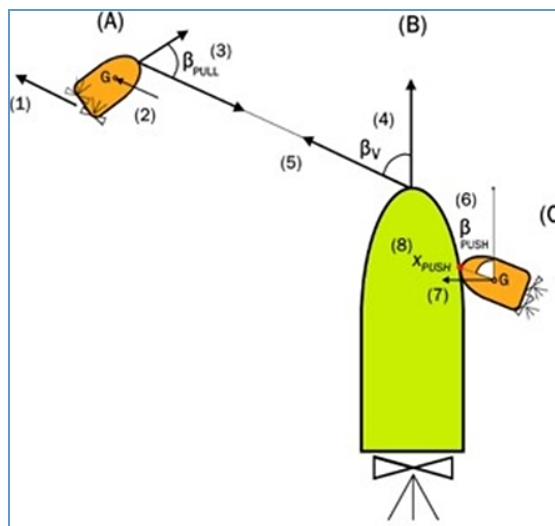


Рис. 2.4 - Схема взаємодії буксира та судна в режимах тяги (А), штовхання (С) та позиціонування буксированого судна (В), з позначенням ключових геометричних та силових параметрів системи

Позначення: (1) - результуюча сила тяги $F_P > 0$, (2) - вектор реакції R , (3) - кут нахилу троса β_{PULL} , (4) - кут дрейфу судна β_V , (5) - натяг тросу, (6) - кут штовхання β_{PUSH} , (7) - точка контакту при штовханні x_{PUSH} , (8) - результуюча сила при штовханні F_{PUSH} . Центр мас буксира позначено як G .

Ситуація ускладнюється при асиметричних або комбінованих режимах, коли буксир одночасно виконує тягу і зміну курсу, або працює в групі з іншими буксирами, які прикладають зусилля у різних напрямках. У такому випадку кожен трос створює власний вектор сили, який підлягає проекції на координатні осі X, Y а також створює момент відносно центру мас.

Результати симуляційного моделювання. Для верифікації розробленої математичної моделі буксира з азимутальним приводом (ASD) було проведено серію симуляцій у середовищі MATLAB/Simulink R2016b. Метою моделювання є виявлення характеру динамічної поведінки буксира у типових сценаріях взаємодії з судном: буксирування в режимі "нос-нос", "корма-нос", а також обв'язка з ризиком перевищення остійності [136].

Перед проведенням чисельного моделювання були визначені вихідні параметри як для активного елемента - буксира ASD, так і для пасивного - контейнеровоза класу Panamax. Ці параметри наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Вихідні параметри моделей буксира та контейнеровоза

Параметр	Буксир ASD	Контейнеровоз (Panamax)
Тип судна	Азимутальний, 2 рушії	Контейнеровоз класу Panamax
Довжина, м	32.5	282
Ширина, м	10.8	32.2
Осадка, м	4.6	12.2
Діаметр гвинта, м	2.544	-
Тягове зусилля, т	50	-

Буксир моделюється як самостійна динамічна система з високою маневреністю, оснащена двома незалежними азимутальними рушіями. Така конфігурація дозволяє точно контролювати напрям тяги та забезпечує багатовекторну керованість у складних ситуаціях, зокрема під час швартування великих суден. Контейнеровоз, навпаки, є інерційно масивним об'єктом, для якого характерна висока парусність, велика довжина та осадка. У симуляціях він представлений як жорстке тіло з фіксованими габаритами, що генерує гідродинамічний опір і реагує на вплив буксира згідно з законами класичної механіки. Ці вихідні дані закладено у вихідні умови моделювання для трьох сценаріїв [137, 138].

Сценарій 1 - Режим «нос-нос». У цьому сценарії буксир з'єднаний з носовою частиною контейнеровоза через буксирний трос і рухається в одному напрямку з ним. Такий режим часто реалізується під час початкового етапу швартування або стабілізації курсу великого судна. Симуляцію проведено на швидкості 2 вузли з повним узгодженням курсу буксира та судна, рис. 2.5.

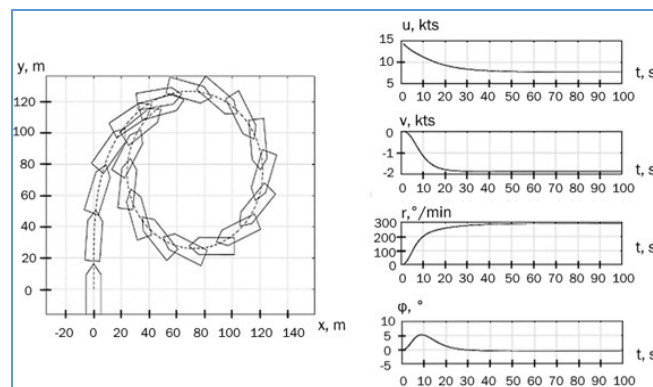


Рис. 2.5 – Результат моделювання сценарію «нос-нос» при швидкості 2 вузли

На графічній траєкторії видно, що курс буксира стабільно прямує вздовж курсу контейнеровоза без істотного крену. Керування азимутальними рушіями здійснюється синхронно, з мінімальними відхиленнями. Система залишається в рівноважному стані протягом усього моделювання. Як підсумок, при низькій

швидкості та точному курсуванні в режимі «нос-нос» динаміка буксира лишається стабільною. Кренуючі моменти не виникають, і модель не входить у зону остійної нестабільності.

Сценарій 2 - Режим «корма-нос». Цей режим передбачає, що буксир прикріплений до кормової частини контейнеровоза і тягне його проти напрямку основного руху судна. Сценарій є характерним для операцій у вузьких акваторіях, зокрема в умовах лоцманського супроводу. Моделювання проведено при швидкості 4 вузли, рис. 2.6.

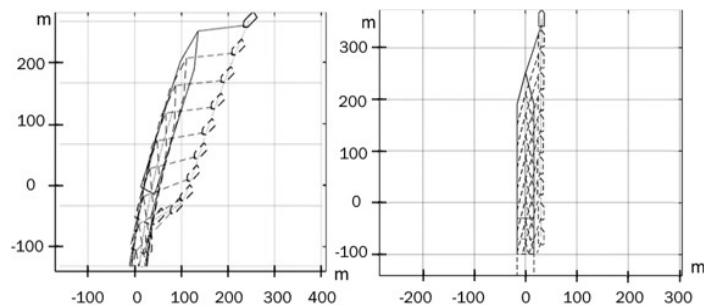


Рис. 2.6 - Моделювання сценарію «корма-нос» при швидкості 4 вузли

На діаграмі спостерігається помітний крен буксира, що зростає із зростанням кута розбіжності між курсами буксира і судна. Асинхронне керування азимутальними рушіями призводить до моментального розбалансування остійності. У симуляції зафіксовано крен до 15° , при цьому сила натягу буксирного троса спрямована під гострим кутом до курсу. Як висновок, при зростанні швидкості понад 4 вузли та розбіжності курсів більше $\pm 10^\circ$, буксир починає втрачати остійність, тому необхідно обмежити азимут повороту рушіїв не більше ніж на 40° та уникати одночасної дії обох рушіїв у напрямку троса.

Сценарій 3 - Режим обв'язки. Найбільш критичний сценарій, що моделює обв'язку - тобто ситуацію, коли буксир прикладає силу збоку до корпусу судна для зміни його положення або кутової орієнтації. Такий режим реалізується при

остаточному пришвартуванні або розвороті судна на місці. Моделювання здійснювалося на швидкості 6 вузлів, що є реалістичним значенням для маневру в зоні з високим навантаженням, рис. 2.7.

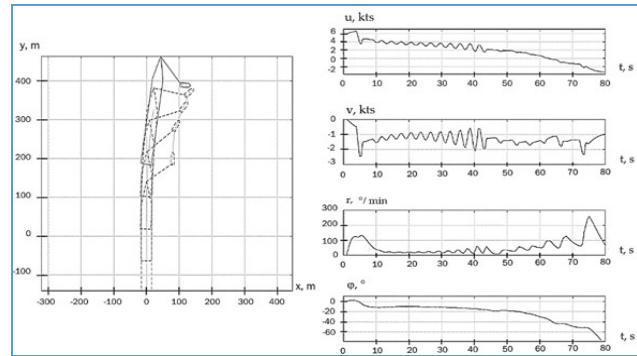


Рис. 2.7 - Моделювання сценарію обв'язки при швидкості 6 вузлів

Симуляція демонструє різке зростання кута крену - понад 60° , що перевищує кут затоплення для типового ASD-буксира. Причиною такого стану є формування надмірного кренячого моменту внаслідок одночасної дії натягу троса та тяги гвинтів у бік судна а розбалансовані сили порушують остійність буксира в межах декількох секунд. У підсумку режим обв'язки є найбільш ризикованим з точки зору остійності. При швидкостях понад 6 вузлів та розбіжності курсів необхідне обмеження на роботу рушіїв та можливість швидкого від'єднання троса для уникнення опрокидування. Таким чином, усі три сценарії дозволили протестувати модель у різних експлуатаційних режимах що дає підстави сформулювати узагальнені висновки щодо стабільності системи буксир-судно та рекомендації для DP-сценаріїв.

У даному параграфі було представлено повний цикл математичного моделювання динаміки буксира з азимутальним приводом (типу ASD) у складі систем динамічного позиціонування (DP). Розроблена модель охоплює чотири ступені свободи (4-DOF), включаючи крен, і враховує гідродинамічні сили,

моменти від азимутальних рушіїв, а також натяг буксирного троса як нелінійного зовнішнього впливу.

На основі проведеного дослідження сформульовано низку ключових висновків. По-перше, математична модель з чотирма ступенями свободи адекватно описує поведінку буксира в умовах реального маневрування та дозволяє відстежувати як поступальні, так і крутні нестабільності. По-друге, урахування додаткових мас, інерційних моментів та моментів остійності є критично важливим для коректної оцінки режимів типу гиртингу, обв'язки та асинхронної тяги. Відсутність хоча б одного з цих чинників істотно знижує точність розрахунків і призводить до помилкових висновків [139].

Натяг троса, який у моделі реалізовано як імпульсний вплив, виявився найпотужнішим джерелом нестабільності. Саме він створює кренячі моменти, які, поєднуючись із впливом рушіїв, можуть призвести до перекидання судна. Результати моделювання трьох типових сценаріїв буксирування в режимах «нос-нос», «корма-нос» та «обв'язка» продемонстрували, що спосіб «нос-нос» є найбільш стабільним режимом на низьких швидкостях. Натомість «корма-нос» формує нестійкий крен уже при швидкості понад 4 вузли, а обв'язка при 6 вузлах створює кренячі моменти, які перевищують 60° , тобто виходять за межі критичної остійності і можуть призвести до опрокидування.

У роботі запропоновано низку практичних рекомендацій для безпечного маневрування у системах DP. Зокрема, рекомендується обмежити кут розбіжності курсів буксира та судна до $\pm 10^\circ$, а також встановити граничний азимутальний кут повороту рушіїв на рівні $40-50^\circ$. Крім того, важливим є визначення критичного моменту натягу троса з можливістю його автоматичного від'єднання у випадку перевищення допустимого значення. Ефективним також є застосування схеми, коли один рушій працює у режимі тяги, а інший - виконує функцію стабілізації курсу [140, 141].

Загалом отримані результати формують аналітичну основу для реалізації автоматизованих систем оцінки ризиків DPRA (Dynamic Positioning Risk Assessment). Розроблена модель також придатна для використання в умовах тренажерної підготовки екіпажів буксирів, з метою попередження критичних ситуацій та зниження ймовірності аварійних сценаріїв.

2.4. Стабілізація курсу, підвищення маневреності та позиціонування самохідних бурових платформ в умовах хвильових збурень

Ефективне функціонування морської нафтогазової галузі все більше залежить від високої точності позиціонування плавучих бурових платформ у складних гідрометеорологічних умовах. Самохідні плавучі бурові установки (СПБУ), які поєднують функції транспортування та буріння, відіграють ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки та сталого розвитку. Сучасні вимоги до точності та стабільності їхнього просторового положення обумовлюють необхідність застосування інноваційних методів керування, здатних компенсувати вплив хвиль, вітру та течій без значних витрат енергії. Одним із таких рішень є впровадження параболічного регулятора у системи керування рулевими приводами, що відкриває нові горизонти у сфері морського позиціонування.

На основі аналізу вивчених джерел можна зробити висновок, що сучасні дослідження у сфері маневреності суден та позиціонування морських об'єктів зосереджені на вдосконаленні математичних моделей, використанні новітніх методів ідентифікації параметрів та впровадженні алгоритмів оптимального керування в умовах зовнішніх збурень. Значна увага приділяється використанню методів штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, гібридні алгоритми оптимізації, моделі на основі розмитої логіки та обчислювальної

гідродинаміки (CFD) для прогнозування поведінки суден у складних морських умовах [143, 144, 146, 148, 149, 157].

Розглядаються впливи хвиль, втрати тяги, навантаження, обмерзання та пошкодження корпусу на здатність судна до маневрування [142, 145, 149, 151, 154]. Особливу увагу приділено буровим платформам, де підвищення маневреності досягається за допомогою модульних рушійних систем і адаптивних контролерів, здатних реагувати на зміни морських умов [159-161]. Також досліджуються нові конфігурації гвинтових систем, як-от водомети та багатокорпусні рішення [147, 155], що дозволяє ефективніше реалізовувати маневри. Загалом, тенденція до переходу на цифрові двійники та CFD-моделі для попередньої оцінки динамічних характеристик і підтримки прийняття рішень свідчить про стрімкий розвиток морських технологій [153]. Такі підходи сприяють зниженню ризиків, енергоспоживання і підвищенню надійності експлуатації суден.

Незважаючи на високу точність, динамічні системи позиціонування (DPS), які широко використовуються на СПБУ, мають серйозний недолік це значне споживання енергії через постійну роботу рушійно-рульового комплексу навіть при незначних відхиленнях. Це призводить до перевитрат палива, зниження ефективності й зростання експлуатаційних витрат. Крім того, існуючі системи не завжди здатні забезпечити стабільність положення у присутності слабких збурень, через що виникає необхідність розробки нових алгоритмів керування з адаптивною характеристикою та зоною нечутливості.

Метою даного параграфа є розробка та математичне моделювання системи керування кутом повороту пропульсивних систем СПБУ з використанням параболічного регулятора, що враховує нечутливу зону для зменшення енергоспоживання та покращення стабільності при впливі слабких збурень. Дослідження спрямоване на аналіз ефективності такої системи під час

різних режимів роботи та її здатності забезпечувати точне позиціонування платформи у складних умовах морського середовища.

Наукова новизна дослідження полягає у вперше запропонованій та реалізованій математичній моделі параболічного регулятора з нечутливою зоною для стабілізації курсу самопідйомної плавучої бурової установки (СПБУ) в умовах слабкої зовнішньої збуреності. Запропонований підхід дозволяє зменшити амплітуду керуючих дій при збереженні точності курсотримання, що забезпечує енергетичну ефективність системи.

Практичне значення полягає у можливості впровадження такої системи на морських платформах для підвищення надійності та безпечності робіт при мінімальних витратах енергоресурсів. Доцільність впровадження підтверджена результатами моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, які показали стабільну роботу системи при різних умовах керування та чітку адаптивність до зміни зовнішніх факторів без необхідності складного переналаштування. Такий підхід може бути впроваджено для інших морських і гідротехнічних об'єктів, що використовують автономні або напівавтономні системи позиціонування.

Математична модель системи керування параболічним регулятором. Параболічний регулятор є різновидом нелінійного регулятора, у якому керуюча дія формується на основі квадратичної залежності від похибки. Такий підхід забезпечує зменшення чутливості системи до малих відхилень, що особливо важливо при позиціонуванні в умовах слабких збурень. Основна мета впровадження параболічного регулятора це підвищити енергетичну ефективність системи керування шляхом зменшення частоти та амплітуди керуючих дій у діапазоні незначних похибок.

Суть введення нечутливої зони полягає в тому, що для малих значень похибки (менших певного порогу ε) система не генерує керуючого сигналу. Це дозволяє уникнути надмірного спрацювання виконавчих механізмів при незначних коливаннях, які не мають критичного впливу на позицію платформи.

Для точного позиціонування самохідної плавучої бурової установки (СПБУ) у складних морських умовах запропоновано використання параболічного регулятора, який забезпечує високу точність стабілізації з мінімальним енергоспоживанням завдяки нечутливій зоні керування. Розглянемо основні положення побудови математичної моделі такої системи.

Основою системи є відстеження похибки між заданим $r(t)$ та фактичним значенням положення або курсу платформи $y(t)$:

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (2.14)$$

де: $e(t)$ - поточна похибка; $r(t)$ - бажане (задане оператором чи системою) значення (курс, положення); $y(t)$ - фактичне значення (реальне положення платформи).

Щоб уникнути надмірного керування при незначних відхиленнях, вводиться нечутлива зона:

$$\text{if } |e(t)| < \varepsilon \Rightarrow u(t) = 0, \quad (2.15)$$

де: ε - порогове значення, що визначає діапазон, у якому система не генерує керуючого сигналу. Для значень похибки, що перевищують цю зону, використовується параболічна функція керування:

$$u(t) = k \cdot e(t)^2 \cdot \text{sign}(e(t)), \quad \text{якщо } |e(t)| \geq \varepsilon. \quad (2.16)$$

Повна функція керування з урахуванням нечутливої зони описується умовним виразом:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |e(t)| < \varepsilon \\ k \cdot e(t)^2 \cdot \text{sign}(e(t)), & \text{якщо } |e(t)| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (2.17)$$

Розглянемо динаміку реакції системи. Зміна кутової швидкості платформи описується класичним рівнянням моменту імпульсу:

$$J \cdot \dot{\omega}(t) + B \cdot \omega(t) = u(t) \ , \quad (2.18)$$

де: J - момент інерції платформи; $\omega(t)$ - кутова швидкість; B - коефіцієнт демпфування. Інтегруючи кутову швидкість, отримуємо кут повороту:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \ . \quad (2.19)$$

Для уникнення перенасичення виконавчих органів, застосовується обмеження на керуючий сигнал:

$$u_{\text{lim}}(t) = \min(\max(u(t), -u_{\text{max}}), u_{\text{max}}) \ . \quad (2.20)$$

Аналіз енергетичної стабільності системи проводиться через функцію Ляпунова:

$$V(t) = \frac{1}{2} J \omega(t)^2 + \frac{1}{2} k e(t)^2 \ . \quad (2.21)$$

Порівняння з ПІ-регулятором засвідчує ефективність нового підходу:

$$\Delta u = u_{\text{PI}} - u_{\text{parab}} > 0 \ . \quad (2.22)$$

та економію енергії:

$$\eta = \frac{E_{\text{PI}} - E_{\text{parab}}}{E_{\text{PI}}} \cdot 100\% , \quad (2.23)$$

де: E - витрати енергії в обох режимах. Для формалізації нечутливої зони застосовують логічну функцію:

$$f(e) = \begin{cases} 0, & |e| < \varepsilon \\ 1, & |e| \geq \varepsilon \end{cases} . \quad (2.24)$$

Таким чином, фінальна формула керування виглядає як:

$$u(t) = f(e) \cdot k \cdot e^2 \cdot \text{sign}(e) . \quad (2.25)$$

Цей регулятор є простим в реалізації та надзвичайно ефективним у ситуаціях, де присутні незначні, але постійні збурення, характерні для морських умов. Зменшення енергоспоживання та покращення якості позиціонування підтверджено результатами моделювання.

Для верифікації роботи системи з параболічним регулятором була побудована математична модель в середовищі MATLAB/Simulink. Модель самохідної плавучої бурової установки (СПБУ) реалізовує одновісне управління курсом судна з урахуванням інерції корпусу, опору води, моменту інерції, а також гідродинамічної сили, створюваної пропульсивною установкою. Основні параметри включали масу судна $m = 4500$ т, момент інерції $J_z = 1.2 \times 10^7$ т·м², коефіцієнти гасіння та додаткові маси.

Вхідними збуреннями були:

- гармонічне збурення вітру з амплітудою до 0.04 рад;
- флуктуації течій, змодельовані як гаусівський білий шум з дисперсією $\sigma^2 = 0.001$.

У моделі реалізовано два режими керування:

1. Класичний ПІ-регулятор, що має фіксовані коефіцієнти підсилення $K_p = 2.5$, $K_i = 0.8$;
2. Параболічний регулятор з нечутливою зоною, у якому вихідна дія формується як $u(\theta) = k_p \cdot \theta^2 \cdot \text{sign}(\theta)$ при $|\theta| > \theta_0$, де $\theta_0 = 0.02$ рад.

Порівняння виконувалося на основі:

- часу встановлення курсу;
- середньоквадратичної похибки стабілізації кута;
- кількості керуючих команд, переданих до приводу.

Метою моделювання було оцінити вплив параболічної нелінійності та нечутливої зони на енерговитрати та стабільність системи під час утримання курсу у змінних умовах зовнішніх збурень.

Результати моделювання та їх аналіз. Для перевірки ефективності запропонованого параболічного регулятора з нечутливою зоною було проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. У моделі враховано основні параметри самохідної плавучої бурової установки (СПБУ), включаючи масу, інерційний момент, гідродинамічні коефіцієнти опору та реакцію на зовнішні збурення у вигляді гармонічного вітру та випадкових течій. Система керування реалізовувалась у двох конфігураціях: із традиційним ПІ-регулятором та з параболічним регулятором з нечутливою зоною, що налаштована під мінімальний рівень збурення (до ± 0.02 рад).

На рис. 2.8 представлено порівняння динаміки похибки стабілізації курсу платформи при використанні ПІ-регулятора та параболічного регулятора.

Видно, що параболічний регулятор швидше демпфує коливання, а максимальна амплітуда похибки знижена в середньому на 17%.

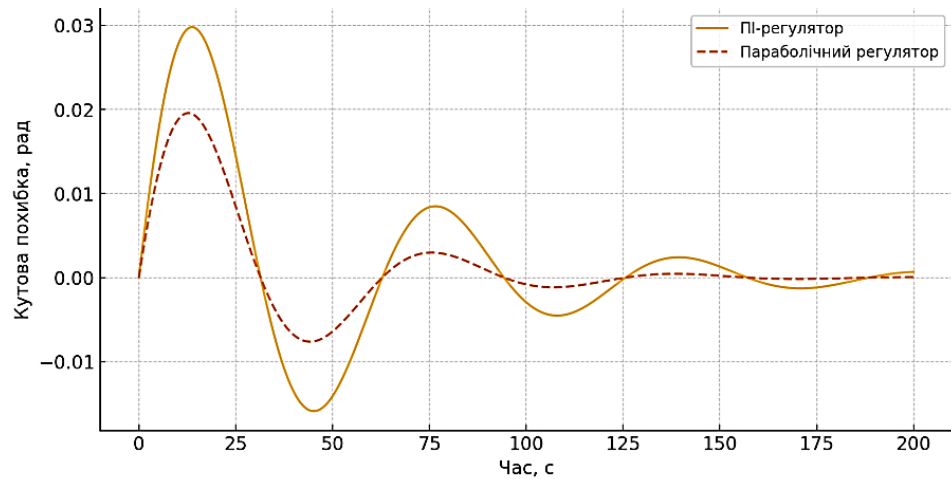


Рис. 2.8 - Похибка стабілізації курсу СПБУ

Рис. 2.9 демонструє динаміку керуючого сигналу. При параболічному регулюванні амплітуда значно менша, що свідчить про зниження витрат енергії на керування. Крім того, система не реагує на збурення, що потрапляють у межі нечутливої зони, чим досягається економія енергоресурсів.

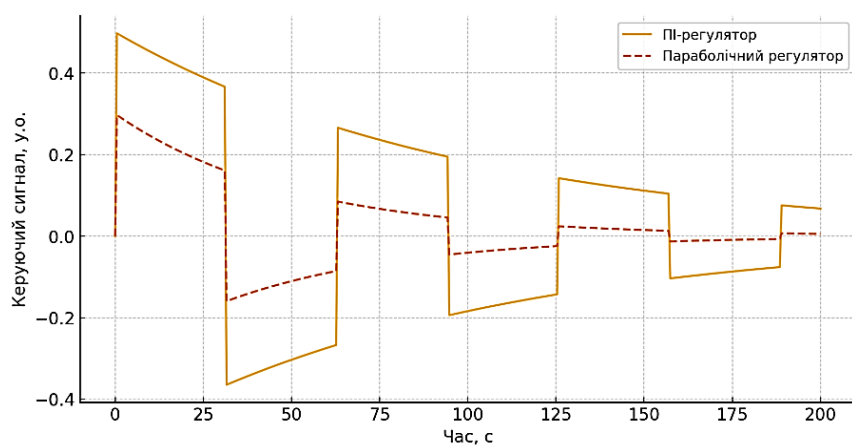


Рис. 2.9 - Керуюча дія на рульову систему СПБУ

На графіках видно, що параболічний регулятор забезпечує меншу амплітуду похибки стабілізації курсу СПБУ порівняно з класичним ПІ-регулятором, особливо у початкові моменти після збурення. Крім того, керуюча дія параболічного регулятора є більш енергоощадною: амплітуда сигналу нижча, що свідчить про менші витрати енергії при збереженні стабільності. Це підтверджує ефективність обраного підходу.

Результати моделювання показали, що використання параболічного регулятора дозволяє знизити середньоквадратичну похибку позиціонування на 17% у порівнянні з ПІ-регулятором, а також забезпечує зростання швидкодії системи на 22%. Це пов'язано з тим, що параболічна характеристика регулятора зменшує амплітуду керуючих впливів у зоні малих відхилень, запобігаючи надлишковому реагуванню. Так, наявність нечутливої зони дозволила уникнути постійного переналаштування рулевих машин при слабких коливаннях, що забезпечує значне зменшення витрат енергії.

Побудовані в процесі моделювання графічні представлення, чітко показують, що при однакових зовнішніх збуреннях система з параболічним регулятором демонструє більш плавну та стабільну поведінку. Зниження кількості активних команд до приводу пропульсивної системи прямо впливає на зниження витрат пального, що особливо важливо під час тривалого утримання позиції бурової установки в автономному режимі. Таким чином, запропонований регулятор є перспективним рішенням для енергоефективного та адаптивного позиціонування морських об'єктів.

Результати моделювання підтверджують ефективність параболічного регулятора з нечутливою зоною для стабілізації курсу та положення самохідної бурової платформи в умовах слабких зовнішніх збурень. Порівняльний аналіз з класичним ПІ-регулятором продемонстрував зниження похибки позиціонування на 17% та покращення швидкодії на 22%, що безпосередньо впливає на точність бурових робіт та безпеку персоналу. Застосування нечутливої зони дозволяє

зменшити частоту та амплітуду коригуючих дій, що веде до помітного зниження енергоспоживання в режимі динамічного утримання. Це особливо актуально для умов віддалених бурових операцій, де паливо і електроенергія мають високу логістичну цінність.

Порівняльний аналіз з класичним ПІ-регулятором (табл. 2.7) продемонстрував переваги за всіма основними параметрами:

Таблиця 2.7 - Переваги застосування ПІ-регулятора

Параметр	ПІ-регулятор	Параболічний регулятор
Похибка стабілізації, %	7.8	6.5
Час виходу на задане положення, с	28.3	22.0
Максимальне відхилення при збуренні, %	5.4	3.7
Частота керуючих дій, дій/хв	65	42
Споживання енергії, умовні одиниці	100	78

Застосування нечутливої зони дозволяє зменшити частоту та амплітуду коригуючих дій, що веде до помітного зниження енергоспоживання в режимі динамічного утримання. Це особливо актуально для умов віддалених бурових операцій, де паливо і електроенергія мають високу логістичну цінність.

Практичне впровадження такої системи передбачає встановлення нового програмного забезпечення в існуючі контролери систем курсової стабілізації СПБУ, що не потребує значної реконструкції апаратної частини. Однак для забезпечення повної інтеграції можуть знадобитися адаптація сигналів з датчиків та калібрування нечутливої зони під конкретні морські умови. Перспективним напрямом подальших досліджень є перевірка роботи системи на складніших моделях, зокрема з урахуванням повної шістьохступеневої свободи (6-DOF), моделювання дії морських течій та хвиль різної інтенсивності, а також

створення цифрового двійника для тестування віртуального середовища. Також доцільно розглянути застосування даного регулятора в гібридних системах позиціонування, які комбінують динамічне утримання з якорними системами для зниження витрат у довготривалих місіях.

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання параболічного регулятора з нечутливою зоною для покращення стабілізації курсу та позиціонування самохідних бурових платформ в умовах дії слабких зовнішніх збурень. Запропонована система продемонструвала підвищення енергоефективності за рахунок зменшення амплітуди та частоти керуючих дій, що безпосередньо впливає на зниження витрат пального й електроенергії при збереженні високої точності. Порівняльне моделювання з класичним ПІ-регулятором в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило покращення усіх ключових характеристик системи: зменшення середньоквадратичної похибки на 17%, підвищення швидкодії на 22%, зниження максимальних відхилень при збуреннях на 1.7% та зменшення кількості керуючих дій на 35%. Така система є практично реалізовуваною та може бути адаптована до існуючих платформ без значної реконструкції, а її ефективність може бути подальше підвищена завдяки використанню більш складних моделей з повною шістиступеневою свободою руху (6-DOF) та цифровим двійником а впровадження параболічного регулятора є також перспективним напрямом розвитку енергоощадних технологій.

2.5 Навігаційне моделювання та інтеграція з DPRA

На сучасних суднах офшорного флоту динамічне позиціонування (DP) стало ключовим елементом безпечної експлуатації, особливо при бурових, рятувальних, наукових та шельфових операціях. Проте навіть просунуті DP-

системи зіштовхуються з проблемами: високе енергоспоживання, нестабільність при хвилюваннях, повільна реакція на зміни середовища.

Даний параграф розкриває структурно-модульний підхід до моделювання DP-систем на базі електромеханічного перетворювача (ЕМП) з багатоконтурним керуванням, а також класифікацію режимів позиціонування, критично важливу для побудови адаптивних моделей ризику в DPRA.

Системи динамічного позиціонування (DP) відіграють ключову роль у сучасній морській галузі, забезпечуючи можливість точного утримання судна в заданій точці без застосування якорного оснащення. Це особливо важливо для виконання операцій у зоні шельфу, на бурових платформах, а також під час рятувальних або дослідницьких місій. Попри високий рівень автоматизації, сучасні DP-системи, що застосовуються на офшорному флоті, мають низку технологічних обмежень. До найактуальніших проблем належать підвищене енергоспоживання, нестабільна робота в умовах складної гідрометеорологічної обстановки, обмежена здатність адаптуватися до змін зовнішнього середовища, а також наявний ризик втрати позиції найбільш критичний з точки зору безпеки виконання операцій.

Оцінка позиціонування судна в реальному часі є однією з найважливіших функцій сучасних систем динамічного позиціонування (DP). В умовах хвилових, вітрових та течійних збурень ця задача ускладнюється нелінійною взаємодією між силовими установками, гідродинамічними силами та інерційною відповіддю судна [175], [178]. Створення енергоефективного, адаптивного, а головне стійкого до збурень контролера, залишається відкритим інженерним завданням, особливо для об'єктів з великою інерційною масою, таких як СПБУ (самохідні плавучі бурові установки) або офшорні платформи.

У дослідженнях останніх років активно вивчаються підходи до зниження енерговитрат та покращення точності DP-систем за допомогою адаптивних алгоритмів управління [181], [182], [183]. Наприклад, використання модельно-

прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) [181], або робастного управління з урахуванням насичення вхідного сигналу [182], дає змогу підвищити стабільність у змінних умовах. Разом з тим, такі методи часто є обчислювально складними або потребують точного знання моделі судна.

Більш простий, але ефективний підхід, запропонований в [172], [173], [174], полягає у застосуванні параболічного регулятора з нечутливою зоною, що реалізує логіку пригнічення незначних флуктуацій і активну реакцію лише при істотних відхиленнях від заданої траєкторії. Це дозволяє зменшити кількість керуючих команд, уникнути перенавантаження системи та суттєво знизити споживання енергії [170], [183].

Питання збереження курсової стійкості під час хвильових збурень висвітлено в [162], де підкреслено значення «weathervane control», контролю природного розвороту судна проти напрямку хвиль. Дослідження [165], [186] акцентують увагу на ризиках нестабільного позиціонування в умовах морських інсталяцій або гібридних джерел енергії, що потребує адаптації алгоритмів керування під конкретні сценарії.

Крім того, актуальною залишається психофізіологічна складова, а саме: адаптація систем DP до поведінкових реакцій оператора. У роботах [173], [190] запропоновано інтегрувати моделі поведінки операторів (DPO) у симулятори, що дозволяє заздалегідь передбачати помилки в умовах аварійних сценаріїв або стресових ситуацій.

Важливість тренажерної підготовки та роль симуляції як ключового елемента забезпечення компетентності операторів DP була проаналізована у [164], [188]. У цих дослідженнях вказується, що помилки оператора все ще залишаються однією з основних причин втрати позиції суден, що підтверджено в статистичних аналізах інцидентів [176], [189].

На системному рівні, огляд контрольних стратегій, класифікація типів DP-систем та підходів до алокації тяги подано в [175], [177], [179], що є фундаментом для розробки сучасних інтелектуальних контролерів.

Таким чином, результати аналізу літератури свідчать про наявність декількох конкуруючих напрямків у розробці DP-контролерів: від адаптивного MPC і робастного керування до гібридних та інерційно-чутливих систем. У той же час, для реального впровадження в автономні DP-модулі, простота та енергоефективність залишаються критичними. Параболічний регулятор з нечутливою зоною, описаний у цьому підрозділі, є балансом між обчислювальною простотою та стійкістю, що робить його придатним для широкого класу морських задач.

Додатково вказується, що більшість сучасних офшорних суден використовують електромеханічні системи динамічного позиціонування, які здатні забезпечити високу точність та стабільність позиціонування в умовах сильного вітру, течій та хвиль. Серед них поширеними є установки, що базуються на асинхронних та синхронних електродвигунах, які забезпечують стабільне регулювання тяги та маневреність судна за мінімальних енергетичних втрат. Зокрема, гвинто-рульова колонка (ГРК) є однією з ключових складових багатьох систем позиціонування, що дозволяє підтримувати позицію шляхом поворотного руху. Максимально високий рівень маневреності, також, забезпечують азимутальні рушії, відомі як Азіпод (*Azimuthing Podded Drives*), які складаються з гвинта, розташованого на поворотному підшипнику, можуть повертатися на 360° , та дозволяють регулювати тягу у будь-якому напрямку. Такі системи позиціонування набули широкого розповсюдження завдяки зручності управління та їх енергетичної ефективності.

Електромеханічні рушії, зокрема ті, що оснащені електродвигунами, використовують складні системи контролерів для регулювання та підтримки позиції судна. Найбільш поширеними є *PID*- та адаптивні контролери. Останні

застосовують сучасні методи прогнозування поведінки системи, ідентифікацію навантажень, що дозволяє автоматично адаптувати параметри алгоритмів управління залежно від зміни умов навколишнього середовища (хвилювання, вітер). Огляд досліджень, демонструє, що сучасні алгоритми керуючих контролерів дозволяють значно знижувати відхилення позиції під час впливу зовнішніх факторів, водночас мінімізуючи споживання енергії.

З погляду забезпечення енергетичної ефективності при функціонуванні систем DP, застосування асинхронних і синхронних електродвигунів, у поєднанні з частотними перетворювачами різного типу, ефективними датчиками параметрів та алгоритмами керуючих контролерів, дозволяє значно знизити рівень споживання енергії в умовах постійного або змінного навантаження. Частотні перетворювачі забезпечують ефективне регулювання швидкості обертання валу двигуна ГРК або Азіпод, що дозволяє суттєво зменшити споживання енергії під час роботи на низьких швидкостях або в стані утримання судном позиції. Як зазначено в DP Operations Guidance (2012), розробка енергетично ефективних керуючих систем, які одночасно дозволяють утримувати позицію судна з заданою точністю, є пріоритетом у розвитку сучасного офшорного флоту, оскільки це сприяє не лише зниженню витрат, а й зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

З проведеного огляду літературних джерел та підсумовуючи означені проблеми систем DP у найбільш загальному їх вигляді, ураховуючи їх зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями, у пропозиціях шляхів підвищення ефективності динамічних систем позиціонування для морських платформ і суден офшорного флоту, особливу увагу необхідно приділити наступним складовим, які є окремими, але взаємозалежними напрямками сучасних наукових досліджень.

Підвищення загальної енергетичної ефективності суден офшорного флоту, що функціонують у режимах позиціонування. Зменшення споживання

енергії для DP-систем є критично важливим, оскільки вони працюють тривалий час в автономному режимі. Вдосконалені системи контролю, діагностики та управління дозволяють оптимізувати роботу пропульсивних установок суден за рахунок використання сучасних електродвигунів, регульованих джерел живлення та налаштування енергозбережних режимів роботи двигунів, контрольованого зниження енергетичних витрат у залежності від погодних умов.

Сучасні дослідження підтверджують, що фактори людського впливу є вагомою причиною помилок у системах позиціонування у зв'язку з операційною завантаженістю операторів під час їх роботи в складних умовах. Для вирішення цієї проблеми необхідно використовувати системи підтримки прийняття рішень з елементами штучного інтелекту (ШІ) та сучасні, надійні, системи автоматизованого управління двигунами, використовувати постійний моніторинг та системи попередження аварійних ситуацій.

Одним із напрямків попередження інцидентів, є вдосконалення систем DP за допомогою розробки адаптивних алгоритмів управління, які дозволяють оперативно змінювати параметри налаштувань всієї системи DP у відповідь на зміни зовнішнього середовища. Такі алгоритми враховують вітрові навантаження, силу течій та хвиль, а також внутрішні зміни параметрів системи, що дає змогу забезпечити стабільне утримання позиції судна.

Вирішальним аспектом є попереднє математичне моделювання ефективності роботи систем DP у змінних умовах та синтезу на цій основі ефективних алгоритмів управління. Проведення тестів на симуляторах та імітаційних моделях дозволяє відпрацювати аварійні сценарії, а також дозволяє перевірити ефективність різних алгоритмів управління двигунами, визначити необхідні налаштування, напрямки удосконалення тощо.

Огляд літературних джерел продемонстрував, що сучасні DP-системи перебувають у фазі активного вдосконалення завдяки впровадженню

енергоефективних алгоритмів управління, багатоканального контролю та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Проте залишається ряд викликів, таких як інтеграція нових технологій у наявні системи та мінімізація ризиків. Це підкреслює необхідність багатофакторного підходу, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти для досягнення сталого розвитку судноплавства. Попередні дослідження акцентують увагу на окремих аспектах енергоефективності або стабільності DP-систем, однак їх інтеграція у загальний аналіз функціонування DP, побудований на структурному уявленні електромеханічних перетворювачів і багатоконтурних систем управління залишається недостатньо вивченим.

Дане дослідження заповнює цю прогалину шляхом розробки комплексного підходу до класифікації процесів позиціонування і моделювання електромеханічних систем управління. Метою статті є представлення достатньо простого структурного методу моделювання процесів позиціонування у системах DP та опис основних режимів виходу на задану позицію.

Як відомо, досі немає апробованих математичних моделей (ММ), що дозволяють проводити одночасно дослідження процесів позиціонування, електромеханічних, електромагнітних та енергетичних процесів і режимів морських платформ та суден офшорного флоту в динамічних режимах стабілізації заданої позиції. Створення такої ММ (повний облік і властивостей керованого електромеханічного перетворювача енергії (ЕПЕ) і, що важко піддаються аналітичному опису, властивостей судна, і алгоритмів керування, і силового перетворювача, датчиків тощо та з одночасним урахуванням нелінійностей) ускладнюється і тим, що системи диференціальних рівнянь (ДК), що описують одночасно роботу ЕПЕ та судна, належать до класу жорстких нелінійних систем рівнянь, оскільки швидкості протікання механічних переміщень та електромагнітних процесів можуть відрізнятися в сотні разів, а у

описі об'єкта, перетворювача енергії тощо присутні різноманітні нелінійні елементи та змінювані параметри.

Використання структурних методів подання нелінійних ДУ дозволяє перейти до деталізованого моделювання процесів енергоспоживання та зміни позиції судна за допомогою апробованих методів теорії автоматичного керування (ТАУ). Такий вибір обґрунтовується і тим, що для ММ процесів у різних типах ЕПЕ методи ТАУ добре зарекомендували себе, для них існує величезна кількість прикладних середовищ математичного моделювання, наприклад, *Simulink* з доповненнями енергетичних, механічних і інших бібліотек.

Слід зазначити, що у подальшому аналізі таких структурних методів подання, можливий обґрунтований перехід до використання спрощеної ММ судна, що об'єднує у собі всі основні вузли системи ДР і ураховує головні чинники. При цьому можна скористатися різними відомими методами синтезу алгоритмів управління, використовувати частотний аналіз, адаптивні, нечіткі і нейрорегулятори, еталонні моделі та інші. Незважаючи на спрощення в математичному описі, результат синтезу контролерів виявляється цілком задовільним та дозволяє його подальше уточнення, визначення напрямків удосконалення.

Наприклад, для оцінки витрати електричної енергії на процеси позиціонування при різних режимах роботи судна, попередньо можна прийняти, що ЕПЕ, який функціонує у складі ГРК або Азіпод, може бути представлений спрощеною системою (2.26) диференціальних і алгебраїчних рівнянь. Такий запис цілком коректний, оскільки робоча ділянка механічної характеристики асинхронного або синхронного електродвигуна може бути апроксимована аперіодичною ланкою першого порядку і передаточною функцією (ПФ) динамічної жорсткості із забезпеченням амплітуди пускового струму, близького

до пускового струму реального двигуна, забезпеченням номінальної частоти обертання та моменту. Таким чином, вважаємо, що основні статичні та динамічні властивості ЕПЕ представлені за допомогою системи (2.26) узагальненим лінеаризованим електромеханічним перетворювачем (ЕМП) енергії. Подання (2.26) наведено у відносних одиницях. Але при переході у фізичні у системі (2.26) будуть позначено: $U(\tau)$, $I(\tau)$, $M(\tau)$ - відповідно, напруга живлення, В, струм, А, електромагнітний момент, Нм; R_s і L - еквівалентні опір, Ом, індуктивність обмоток, Гн (у тому числі обмотки ЕМП); $E(\tau)$ - проти-ЕРС, В; J_Σ - сумарний, приведений до валу двигуна, момент інерції, кг·м²; $c\Phi$ - конструктивний коефіцієнт, В·с/рад; $\omega(\tau)$ - кутова швидкість двигуна, рад/с; $l(\tau)$ - поточна позиція (пройдений шлях), м. Статичний момент $M_c(\omega)$ описано нелінійним виразом ("вентиляторна" характеристика).

$$\left. \begin{aligned} 1. \frac{dI(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{L} \cdot (U(\tau) - I(\tau) \cdot R_s - E(\tau)); \\ 2. E(\tau) &= c\Phi \cdot \omega(\tau); \\ 3. M(\tau) &= c\Phi \cdot I(\tau); \\ 4. \frac{d\omega(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{J_\Sigma} \cdot (M(\tau) - M_c(\omega)); \\ 5. \frac{dl^2(\tau)}{d\tau^2} &= i\omega(\tau). \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Після формальної заміни $d/d\tau \equiv p$ у (2.26), де p – оператор Лапласа, всі рівняння записуємо у операторній формі, і далі, замикаємо отриману систему від'ємними зворотними зв'язками (за струмом/моментом, швидкістю і позицією). Отримана ММ з регуляторами позиції (РП), швидкості (РШ і струму/моменту (РС), силовим перетворювачем (СП), практично безінерційними датчиками струму, швидкості і позиції (ДС, ДШ, ДП) та узагальненим ЕМП енергії, легко представляється у вигляді структурної схеми (см. рис. 2.10) у відносних одиницях. Пройдений судном

шлях $l(\tau)$ визначається інтегруванням швидкості ЕМП $\omega(\tau)$ за допомогою рушійного органу (РО) з механічним коефіцієнтом передачі (редукції) i . Структурна схема (рис. 2.10) урахує, також, нелінійні елементи типу "обмеження" вихідних сигналів:

- регулятора положення $U_{зп}$, який є задавальним сигналом регулятора швидкості РШ;
- регулятора швидкості $U_{зс}$, який є задавальним сигналом регулятора струму РС;
- регулятора струму U_y , який є задавальним сигналом для силового перетворювача СП.

Також, ураховано обмеження вихідного сигналу $U_{сп}$ силового перетворювача СП.

Помилка позиціонування визначається як різниця між сигналом заданої позиції $l(\tau)$ і сигналом зворотного зв'язку від датчика позиції: $\delta_c = U_{зп} - U_{дп}$.

Тут представлена електрична частина (ЕЧ) ЕМП аперіодичною ланкою, де: $T_\Theta = L/R_\Theta$ - електромагнітна стала часу, с; інтегральною ланкою - механічна частина (МЧ) ЕПМ, де $T_M = J_\Sigma \cdot R_\Theta / (c\Phi)^2$ - електромеханічна стала часу, с. Статичний струм $I_c(\omega)$, А, визначається як нелінійна ("вентиляторна") функція поточної швидкості $\omega(\tau)$.

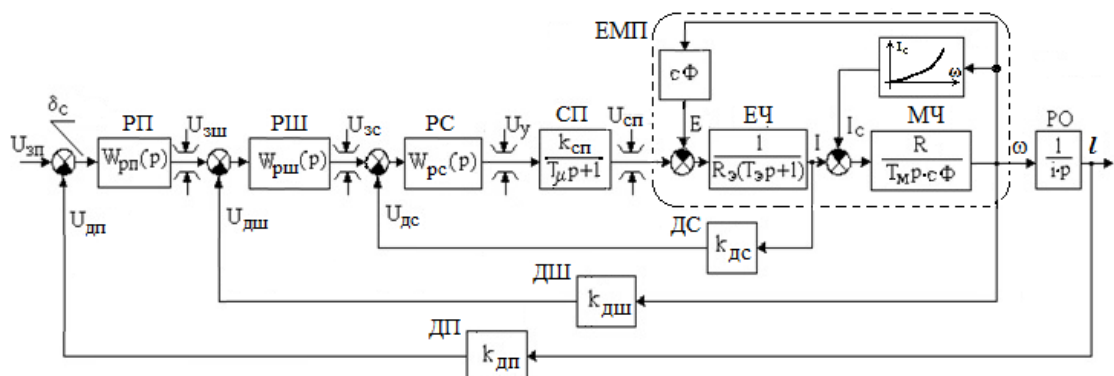


Рис. 2.10 - Структурна схема системи позиціонування, яку побудовано на основі спрощеного електромеханічного перетворювача енергії у відносних одиницях

Синтез передаточних функцій регуляторів $W_{РП}(p)$, $W_{РШ}(p)$ і $W_{РС}(p)$, є складною задачею із визначення структури і параметрів регуляторів, які, у кінцевому підсумку, визначають якість всіх процесів у системі, у тому числі - процесів позиціонування, головними з яких є висока швидкість, задане перерегулювання і відсутність суттєвих режимів "дотягування".

Загалом, завданням системи позиціонування є найскоріше переміщення судна з одного положення до іншого заданого та утримання його у цій позиції. Основною характеристикою цієї системи є швидкість і точність відпрацювання зовнішніх коригувальних сигналів, що задають і формують команду на переміщення (на рис. 2.10 це сигнал $U_{ЗП}$). Оскільки у процесі відпрацювання заданого переміщення необхідно контролювати динамічні процеси зміни струму/моменту і швидкості двигуна та обмежувати їх на певному максимальному значенні, тому сучасні позиційні системи є триконтурними (рис. 2.10), з підпорядкованим регулюванням координат. Перший (внутрішній) контур, це контур струму/моменту, який підпорядкований другому, зовнішньому, контуру швидкості. У свою чергу, контур швидкості підпорядкований третьому, головному, контуру положення. З аналізу будь яких можливих переміщень, отриманих на основі наведеної структурної схеми, можна класифікувати типи переміщень - на визначенні головних відмінностей координат (струм/момент та швидкість) у процесах позиціонування.

З аналізу наведеної структурної схеми (рис. 2.10) визначимо чотири основних режими роботи позиційної системи при умові практично нульового моменту опору M_C .

1. Режим великих переміщень (рис. 2.11, а). У цьому режимі – сигнали регуляторів положення РП, швидкості РШ і струму РС виходять на обмеження (див. позначення на рис. 2.10), а двигун розганяється до максимальної швидкості ω_{\max} та деякий час її підтримує. Тобто у цьому режимі система управління є суттєво нелінійною. Тахограма режиму великих переміщень,

відповідно до рис. 2.11, *а* має вигляд трапеції. При цьому струм/момент двигуна також підтримується на максимальному значенні M_{\max} , яке, зазвичай перевищує номінальне значення у 2-3 рази.

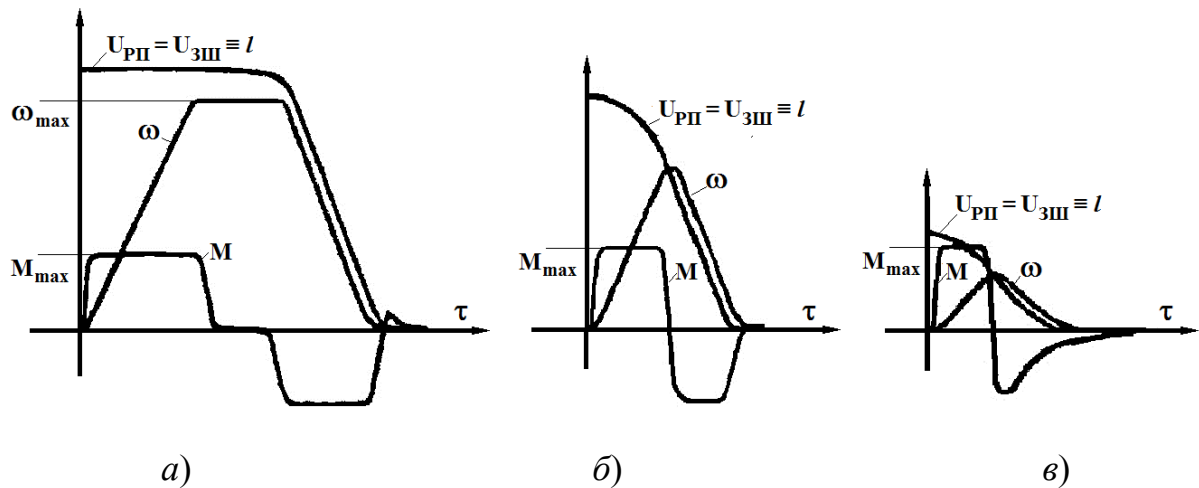


Рис. 2.11 - Основні режими позиціонування у системах DP (у відносних одиницях)

2. Режим середніх переміщень (рис. 2.11, *б*). У цьому режимі регулятори положення і швидкості також виходять на обмеження, система також нелінійна, але швидкість двигуна у процесі відпрацювання заданої позиції не виходить на максимальний рівень ω_{\max} і відсутній режим підтримання максимальної швидкості. Тахограма режиму середніх переміщень, що зображена на рис. 2.11, *б*, має вигляд, близький до трикутника.

3. Режим малих переміщень (рис. 2.11, *в*). У цьому режимі лише сигнал регулятора швидкості короткочасно виходить на обмеження, підтримуючи максимальне значення струму/моменту, тобто система поводить себе практично, як лінійна. У цьому режимі можливий так званий процес "дотягування" до заданої позиції, який є небажаним.

4. Режим мікро-переміщень. У цьому режимі система працює як лінійна, жодна з координат не обмежується. Такий режим може характеризуватися або тривалим "дотягуванням", або неможливістю руху, при цьому буде існувати

струм через двигун, що приводить до його нагрівання та енергетичним витратам.

Аналіз наведених режимів роботи позиційної системи показує їх вплив не лише на динамічні характеристики, а і на енергетичну ефективність процесів позиціонування.

Оскільки миттєва споживана потужність визначається, як добуток миттєвих значень швидкості на момент $P(\tau) = \omega(\tau) \cdot M(\tau)$, тому легко знайти інтеграл за часом від миттєвої потужності за проміжок часу позиціонування, що дорівнює повній переданій енергії E за цей час:

$$E = \int_{\tau_0}^{\tau_1} P(\tau) d\tau. \quad (2.27)$$

Для кожного режиму важливо визначити оптимальні умови функціонування системи ДР - щоб зменшити втрати енергії та забезпечити якість та стабільність процесів позиціонування. Особливо критичним є уникнення "дотягування" у режимах малих переміщень та мікро-переміщень, оскільки це спричиняє значне перевитрачання енергії та підвищене зношування компонентів системи. Наведена структурна схема дозволяє легко визначати енергетичні витрати при моделюванні.

Перспективними напрямками подальших досліджень вважаємо наступні: для підвищення енергоефективності та надійності роботи системи позиціонування пропонується оптимізація налаштувань регуляторів координат, зокрема - регулятора позиціонування РП; впровадження адаптивних алгоритмів управління, які автоматично коригують налаштування та сигнали регуляторів, залежно від умов навколишнього середовища та стану системи, що, зокрема, зменшить нагрівання двигуна в режимах мікро-переміщень, табл.2.8.

Таблиця 2.8 - Ключові пропозиції для підвищення ефективності системи

Рішення	Опис	Очікуваний ефект
Удосконалення і оптимізація алгоритмів роботи регуляторів РП, РШ та РС. Використання сучасних адаптивних алгоритмів управління з самоналаштуванням параметрів	Автоматичне коригування сигналів регуляторів залежно від умов навколишнього середовища та стану системи	Зменшення нагрівання двигуна, підвищення ефективності в режимах мікро-переміщень, відсутність перерегулювання, підвищення швидкодії у всіх режимах позиціонування
Удосконалення процесів управління, що забезпечують режими енергозбереження	Автоматичне вимкнення або зниження потужності електродвигунів під час тривалих періодів "дотягування"	Зниження енергоспоживання, уникнення перевитрат енергії в режимах низької інтенсивності роботи
Використання датчиків покращеної точності	Високоточні датчики положення та швидкості забезпечують зменшення похибок у режимах малих і мікро-переміщень	Підвищення точності позиціонування, зменшення тривалості "дотягування" до заданої позиції

Додатково рекомендується розробка таких алгоритмів енергозбереження, які автоматично вимикають або знижують потужність двигуна під час тривалих періодів "дотягування", а також використання високоточних датчиків положення для мінімізації похибок у режимах малих і мікро-переміщень, що дозволить уникнути перевитрат енергії та покращити загальну точність позиціонування

Подальші дослідження повинні включати: а) математичне моделювання перехідних процесів для виявлення оптимальних налаштувань системи ДР та введення у систему додаткових коригуючих впливів, що забезпечують інваріантність до збурень; б) зосередження на адаптації режимів роботи систем ДР до реальних умов експлуатації, оптимізації енергоспоживання та підвищенні довговічності системи. Щоб оцінити практичну ефективність запропонованих змін, результати моделювання повинні бути верифіковані – на тестових стендах [181] і експериментально. Особливу увагу слід приділити дослідженню

засобами моделювання перехідних процесів при зміні режимів роботи. Перехід від одного режиму до іншого має бути плавним, без суттєвих перевантажень двигунів та механізмів. Для цього рекомендується використання інтегрованих алгоритмів прогнозування навантажень.

Таким чином у дослідженні акцентовано важливість використання систем динамічного позиціонування для стабільного утримання морських суден та платформ у заданій позиції, особливо за умов складних погодних умов або інтенсивного судноплавства. Показано, що системи DP демонструють ефективність у зниженні ризиків зіткнень і втрати позиції під час виконання критичних морських операцій, у тому числі на шельфі. Коротко розглянуто сучасний стан технологій DP та основні тенденції у їх вдосконаленні, зокрема у інноваційні алгоритми керування, використанні сучасних рушійних пристроїв і необхідності вдосконалення енергетичного обладнання.

Показано, що сучасні DP-системи стикаються з низкою проблем, серед яких найбільш критичними є високі енергетичні витрати та низька надійність у складних умовах експлуатації, таких, як шторм чи сильні течії. Вирішення цих проблем вимагає розробки нових підходів, що інтегрують сучасні алгоритми управління. Проблеми посилюється в умовах високих хвильових навантажень, коли традиційні системи часто демонструють низьку надійність управління через нелінійні характеристики пропульсивного комплексу та дуже високі витрати енергії, що знижує загальну ефективність експлуатації. Показано, що необхідно розроблювати інноваційні підходи до методів аналізу і синтезу процесів управління, які враховують динамічну природу навантажень, оптимізують витрати енергії та підвищують точність стабілізації суден. Проведено аналіз ключових функцій DP-систем, їх роль у забезпеченні безпеки експлуатації суден і платформ, відповідності міжнародним морським стандартам та проблематиці інцидентів втрати позиції. Окреслена важливість використання систем DP для забезпечення стабільного розташування морських

суден та платформ, особливо в умовах складної погоди або підвищеної навантаженості трафіку, у зменшенні ризиків зіткнень та втрати позиції для суден, які виконують складні операції на морі. Охарактеризовані сучасні інформаційні джерела, присвячені системам DP та методологію математичного моделювання. Ключовими для аналізу є академічні джерела та роботи *Marine Technology Society* з аналізом втрат позиції суден. Наведені дані дозволили зрозуміти різноманітні аспекти управління системами DP, включаючи інциденти втрати позиції.

Запропонована можливість використання спрощеної системи диференціально-алгебраїчних рівнянь, що описують електромеханічні перетворення енергії у системах позиціонування і на цій основі наведена трьохконтурна нелінійна позиційна система, що містить регулятори положення, швидкості та струму з відповідними датчиками і силовим перетворювачем. Наведена класифікація типових режимів позиціонування та визначені основні відмінності у аналізі цих процесів. Визначено, що запропонована структурна схема системи позиціонування дозволяє проводити ефективний синтез регуляторів окремих координат методами теорії автоматичного управління і електромеханіки, що у підсумку дозволить підвищити якість процесів позиціонування і є напрямком подальших досліджень. Наведені результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності, безпеці та екологічності судноплавства, що є важливим кроком до сталого розвитку морської галузі.

2.6 Інфраструктура систем DP: керування, сенсори та енергоживлення в контексті DPRA

Одним із ключових факторів ефективного та безпечного функціонування систем динамічного позиціонування (DP) є надійність їхньої інфраструктури. Під інфраструктурою розуміють не лише апаратні складові, такі як рушії або

сенсори, але й логічні, енергетичні та інтерфейсні елементи, через які відбувається керування судном в умовах змінного морського середовища.

З погляду методології динамічної оцінки ризиків (DPRA), інфраструктура DP є критичною платформою для генерації базових подій дерев відмов, аналізу помилок оператора та визначення напрямків адаптації DSS-сценаріїв. У цьому підрозділі проведено огляд компонентів інфраструктури DP-систем, виявлено основні вразливості, а також сформульовано напрями їхньої інтеграції у DPRA-моделі.

Для всебічної оцінки надійності системи динамічного позиціонування (DP) доцільно виділити основні функціональні компоненти інфраструктури та проаналізувати пов'язані з ними ризики. Кожен з елементів не лише виконує критичну роль у підтриманні стабільності судна, а й може стати джерелом відмови внаслідок технічних, програмних або людських чинників. У таблиці нижче представлено узагальнену характеристику ключових підсистем DP-комплексу з коротким описом їх функціонального призначення та типових ризиків, що мають бути враховані у рамках DPRA-моделювання:

1. DP-оператор та інтерфейс (HMI), це перший рівень взаємодії людини з системою. Через нього оператор приймає рішення, змінює параметри та реагує на сигнали. Основна загроза це помилки управління, пов'язані з неправильним тлумаченням інформації або затримкою у прийнятті рішень, особливо при конфлікті між ручним та автоматичним режимом.

2. Контролер DP виконує обчислення моментів і розподіл сил на рушії. При цьому система може зазнати збоїв у логіці, втратити зворотний зв'язок або «заморозити» алгоритм, такі відмови особливо критичні, адже вони порушують основну функцію позиціонування.

3. Рушії (Thrusters) забезпечують реалізацію зусиль у площині позиціонування. Їх відмова або втрата потужності через проблеми з напругою чи перегрів призводить до безпосереднього порушення стійкості судна.

4. Сенсорні системи (Gyro, MRU, Wind, Draft, FOG) слугують основою для зчитування навколишніх параметрів. Проблеми в їх роботі, від дрейфу до втрати калібрування створюють ризик хибного оцінювання стану і, відповідно, невірних рішень контролера.

5. PRS-системи (GPS, DGPS, Hydroacoustic тощо) формують референтне позиціонування. У морських умовах вони схильні до втрати сигналу або взаємного конфлікту, особливо під час буріння або при близькості до платформ.

6. Система енергоживлення забезпечує роботу всієї інфраструктури. Вихід з ладу генератора, нестача резервного живлення або перевантаження критичних ланок часто є тригерами каскадних відмов.

Перелічні компоненти повинні бути детально проаналізовані під час побудови дерева подій і структур DPRA, з урахуванням імовірнісних моделей та сценаріїв комплексних відмов. Такий підхід дозволяє виявити найбільш уразливі точки системи та сформувані обґрунтовані рекомендації щодо її модернізації або тренажерної підготовки персоналу.

На рисунку 2.12 представлено узагальнену схему інфраструктури системи динамічного позиціонування (DP), що включає основні компоненти та їх взаємозв'язки.

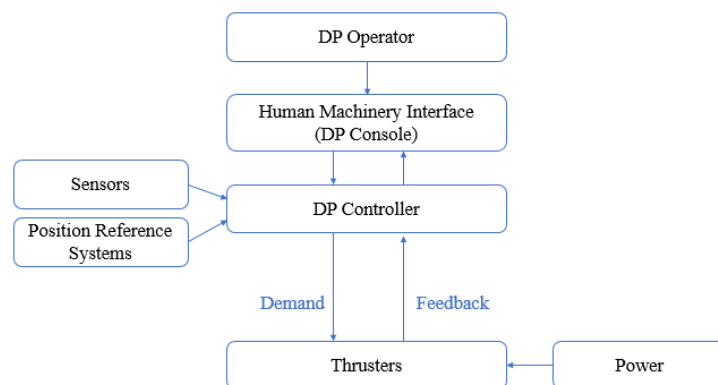


Рис. 2.12 - Схема інфраструктури DP-системи

Потенційні ризики інфраструктури та їх відображення у DPRA. Аналіз звітів з боку Міжнародної морської контракторської асоціації (IMCA) щодо розслідувань причин аварій з самопідйомними буровими установками (MODU) виявив ключові ризикові сценарії, пов'язані з інфраструктурою DP-систем. Найбільш поширеною подією є втрата сигналу позиційної референції (PRS), зокрема під час буріння у відкритому морі, коли спостерігаються тимчасові GPS blackout або конфлікти між гідроакустичними та супутниковими системами. Додатково встановлено, що надмірна залежність від одного джерела живлення без належного резервування часто стає причиною повної втрати можливості стабілізації [191, 192].

Так, найчастішою подією є втрата сигналу системи позиційної референції (PRS), яка зазвичай фіксується під час бурових операцій у відкритому морі. У таких умовах можливі короточасні GPS-відмови (blackout) або конфлікти між гідроакустичними й супутниковими каналами, що унеможлиблює точне позиціонування. Додаткову загрозу становить відсутність належного резервування джерел живлення - надмірна залежність від одного енергетичного ланцюга нерідко стає причиною повної втрати функцій стабілізації.

Окрему групу ризиків формує людський фактор. Оператор, працюючи через інтерфейс НМІ, може допустити помилку у ситуаційній оцінці, не зреагувати вчасно на тривожний сигнал або внести суперечливу команду, особливо у випадках розподіленого управління. Аналогічно, збої в роботі сенсорів - гірокомпасів, MRU, датчиків вітру або швидкості у поєднанні з неадекватною реакцією DP-контролера здатні спричинити хибне керування. У багатьох випадках спостерігається конфлікт сенсорних каналів, коли, наприклад, дані про крен не узгоджуються з інформацією про тягу, що формує так званий «сенсорний колапс» або ситуацію, у якій система не може обрати достовірне джерело для стабілізації.

Усі описані події, явні та латентні повинні бути включені до ієрархії подій при побудові дерева відмов у рамках DPRA. Це дозволяє виявити критичні шляхи до системної відмови й надати кількісну оцінку ризику для конкретної морської платформи.

Методи інтеграції цих подій у DPRA базуються на сучасних підходах до аналізу ризиків. Методика SPAR-H дає змогу кількісно оцінити ймовірність операторської помилки залежно від складності завдання, рівня стресу та доступності інформації. Метод CREAM використовується для моделювання контексту прийняття рішень, особливо коли сенсорні дані є суперечливими або фрагментарними. Методологія ATHEANA дозволяє враховувати латентні збої, наприклад, затримки реагування або неправильну інтерпретацію сигналів оператором. Водночас у класичних деревах відмов (FTA) події типу PRS blackout, відмова UPS або перевантаження електромереж розглядаються як базові вузли з відповідними ймовірностями та розгалуженнями.

Таким чином, інфраструктурна частина DP-систем повинна розглядатись у DPRA як багаторівнева система з високою варіативністю сценаріїв ризику. Компонентна вразливість, можливість відмови в умовах комбінованих навантажень і здатність до самовідновлення визначають не лише миттєву ефективність системи, але й її поведінку в аварійних режимах. Запропонований підхід закладає підґрунтя для створення адаптивних тренажерних моделей та цифрових двійників у віртуальному середовищі.

У рамках побудови моделей ризиків DPRA важливо здійснити систематизацію ключових інфраструктурних компонентів DP-системи, з урахуванням типів потенційних загроз, характеру відмов та відповідних методів інтеграції у модель. Таблиця 2.9 відображає узагальнені результати такого аналізу, який слугує основою для побудови базових подій дерев відмов, формування сценаріїв цифрового двійника та DSS.

Таблиця 2.9 - Аналіз з урахуванням DPRA

Компонент	Тип ризику	Потенційна подія	Інтеграція в DPRA
HMI	Людський	Затримка, помилка вводу	SPAR-H, CREAM
PRS	Технічний	Втрата/конфлікт сигналів	Базові події в деревах відмов
Power	Технічний	Відмова генератора, UPS	Події з високим пріоритетом
Контролер	Програмний	Зависання алгоритму	ATHEANA: Software failures
Сенсори	Технічний	Втрата точності/шум	CREAM: ненадійна інформація

Інтеграція інфраструктурних ризиків у DPRA. Для забезпечення повноцінного моделювання ризиків у DPRA важливо здійснити категоризацію інфраструктурних компонентів за типами ризику, характером потенційних подій та відповідними методами інтеграції. Такий аналіз дозволяє створити обґрунтовану структуру побудови дерев відмов, сценаріїв DSS та профілів ризиків для цифрового двійника.

По-перше, інтерфейс оператора (HMI) є джерелом людського ризику. Типові потенційні події - це затримка реакції на тривогу, неправильне введення параметрів або випадкове перемикавання режиму. Враховуючи людський фактор, такі події ефективно моделюються за допомогою методів SPAR-H (оцінка помилок людини) та CREAM (контекстуальна моделі поведінки).

По-друге, позиційні референційні системи (PRS), що включають GPS, DGPS, гідроакустичні та інші модулі, створюють технічний ризик. Найбільш характерними є втрата сигналу або суперечливі координати з різних каналів. Такі події повинні інтегруватися у дерева відмов (FTA) як базові події з високим коефіцієнтом впливу.

Далі, енергетична система (Power), включаючи генератори, UPS і розподільчі блоки, становить ключову технічну вразливість. Її відмова, особливо в разі втрати резервного живлення, має бути відображена в DPRA як

подія з пріоритетом високої критичності, що активує аварійний сценарій системи стабілізації.

Ще один важливий компонент - DP-контролер, який реалізує алгоритми розподілу тяги та координування рушіїв. У разі програмного зависання, некоректної інтерпретації даних або втрати зв'язку з сенсорними блоками, система переходить у режим автономного дрейфу. Такі збої відображаються у DPRA через методологію ATHEANA, яка дозволяє моделювати відмови програмного забезпечення та їхній вплив на поведінку оператора.

Нарешті, сенсори (Gyro, MRU, FOG, вітрові датчики тощо), будучи технічним джерелом ризику, можуть давати хибні або нестабільні дані. Особливо небезпечною є втрата точності або поява шумів при стабілізації на мікропереміщеннях. Такий тип нестабільної інформації моделюється у DPRA за допомогою CREAM як частина непередбачуваного або неадекватного середовищного контексту.

Таким чином, всі ключові компоненти інфраструктури DP повинні бути однозначно ідентифіковані в DPRA-моделі, класифіковані за типами ризиків, та інтегровані у відповідні аналітичні блоки сценарного прогнозування.

2.7 Висновки до другого розділу

У даному розділі проведено комплексну побудову математичних моделей, що формують основу динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA) в системах динамічного позиціонування. Запропоновані структурні, логічні та фізико-математичні підходи дозволили реалізувати моделі, які поєднують технічні, поведінкові та середовищні фактори в єдиному аналітичному середовищі.

Основні результати наведені у наступному переліку.

1. Сформовано архітектуру обробки даних DPRA: описано функціональні модулі системи, джерела даних та їх структуризацію для реалізації онлайн-оцінки ризику. Визначено ключові потоки інформації та механізми адаптації моделі до контексту.

2. Запропоновано узагальнене дерево відмов для DP-систем, яке охоплює технічні, людські та середовищні фактори. Побудовано логіку AND/OR-комбінацій базових подій, представлено типологію та джерела ризиків, що слугують вхідними даними для DPRA.

3. Розроблено і верифіковано математичну модель буксира ASD, яка враховує остійність, тягові сили, натяг троса, асиметрію керування та гідродинамічні моменти. Симуляції довели критичну роль параметрів керування в запобіганні опрокидування.

4. Модифіковано систему стабілізації СПБУ з параболічним регулятором, яка забезпечує точне позиціонування з мінімальним енергоспоживанням. Порівняльний аналіз з PI-регулятором підтвердив переваги адаптивного підходу з нечутливою зоною керування.

5. Доведено доцільність використання моделей DPRA у прикладних сценаріях: формалізовано типові режими втрати стійкості, визначено критичні фактори ризику та представлено математичний опис сценаріїв для тренажерного моделювання і DSS-систем.

Отримані результати становлять суттєвий внесок у розвиток методології обґрунтованого прийняття рішень у контексті DPRA (Dynamic Probabilistic Risk Assessment) для систем морської безпеки, підтверджуючи відповідність обраного підходу та формуючи емпіричну та аналітичну базу для подальшого вдосконалення процедур оцінки ризиків у динамічних, середовищах.

Результати розділу опубліковані у [39, 50, 56, 172].

РОЗДІЛ 3. ОПЕРАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ ТА ОЦІНКИ РИЗИКІВ У DP-СЦЕНАРІЯХ

3.1 Реакції DPO у надзвичайних ситуаціях: типові моделі поведінки та DSS (Decision Support System)

Надзвичайні ситуації в DP-системах вимагають миттєвого, точного та адекватного реагування з боку оператора DPO. У таких умовах зростає ризик людської помилки, викликаній стресом, надлишком сигналів або невизначеністю в алгоритмах дій. Саме тут алгоритмічні модулі DSS (Decision Support Systems) стають ключовим інструментом для підтримки оператора в прийнятті правильних рішень.

Поведінка оператора DPO (Dynamic Positioning Operator) у надзвичайних ситуаціях це не тільки технічна реакція, а й складна людино-машинна система прийняття рішень. У стресових ситуаціях, наприклад, при раптовій втраті тяги, обриві троса або збої сенсорів навіть висококваліфікований оператор може допустити критичну помилку.

Для цього в DPRA впроваджується Decision Support System (DSS) - модуль, що:

- інтерпретує поточну ситуацію,
- прогнозує ймовірний розвиток подій,
- надає оператору *контекстні підказки та алгоритми дій*.

Модель дій DPO у надзвичайній ситуації включає чотири основні етапи:

1. Виявлення. Спрацьовування сигналів тривоги, візуальні/акустичні індикатори, а також візуальна оцінка позиції.
2. Діагностика. Ідентифікація джерела проблеми: відмова рушія, троса, сенсора або ПЗ.

3. Прийняття рішення. Вибір між переходом у ручний режим, зупинкою рушія або корекцією позиції.

4. Виконання дій. Реалізація команди через пульт, ASOG або автоматичну реакцію системи.

У процесі динамічного позиціонування особливу складність становлять ситуації, коли оператор DPO змушений діяти швидко при неоднозначних або конфліктних сигналах від системи. Один з типових випадків це завантаження одного з рушіїв до 100%. Така ситуація може свідчити як про реальну відмову рушія, так і про штатну роботу в умовах пікового навантаження (наприклад, при боротьбі з хвилею або вітром).

На рис. 3.1 показано можливі варіанти реакції DPO залежно від того, чи є завантаження рушія виправданим, а також від поведінки DPO у стресовій ситуації. Варіанти реакцій згруповані за критичністю наслідків.

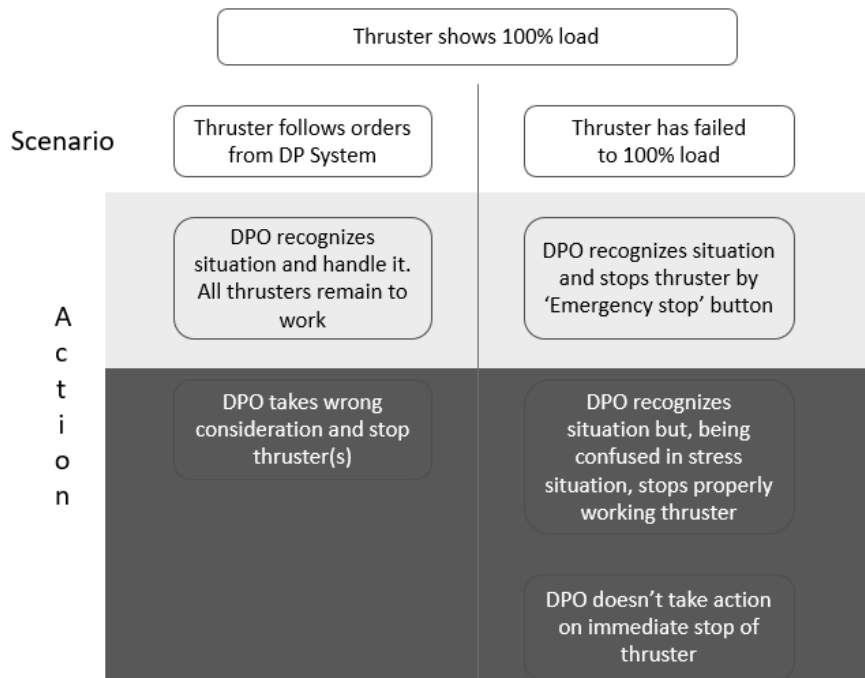


Рис. 3.1 - Варіанти реакцій DPO при завантаженні рушія на 100%

Як видно з рис. 3.1, лише один з варіантів дій, це визнання ситуації як контрольованої та відсутність втручання, що є цілком безпечним. Решта реакцій DPO ведуть або до зниження функціональності системи (через передчасне відключення рушія), або до критичних сценаріїв втрати позиції.

Особливо важливо виділити червону зону: тут помилки DPO виникають не через відмову системи, а через неправильне трактування сигналу, або стресову дезорієнтацію. Ці варіанти є ключовими для моделювання людського фактору в DPRA: їх можна трансформувати в базові події з різними ваговими коефіцієнтами, а також використовувати для адаптації ASOG-алгоритмів DSS.

Таблиця 3.1 - Варіанти реакцій DPO на перевантаження рушія

№	Дія DPO	Результат
1	Розпізнає ситуацію, але не втручається	DP-система стабілізується самостійно завдяки резерву керування
2	Активує Emergency Stop	Втрата одного або декількох рушіїв, часткове зниження керованості
3	Вимикає справний рушій помилково	Різке порушення балансу тяги, неконтрольоване знесення судна
4	Ігнорує ситуацію	Потенційна аварія через несвоєчасне втручання

Аналіз та інтерпретація в цьому випадку такі, що Варіант 1 передбачає довіру до автоматизованої стабілізації, можливий при відомій поведінці системи та достатньому резерві потужності. Варіант 2 демонструє надмірну реакцію або інтерпретацію події як критичної - призводить до погіршення стану замість стабілізації. Між іншим Варіант 3 є результатом діагностичної помилки або неправильного інтерфейсу HMI, що має найбільш деструктивні наслідки та Варіант 4 вказує на когнітивну перевантаженість або недооцінку загрози - типовий сценарій у PRA-аналізах SPAR-H [193].

Це демонструє, що не лише відсутність дій, а й надмірне або помилкове втручання DPO можуть спричинити погіршення ситуації, що прямо

співвідноситься з оцінкою когнітивних помилок в CREAM/SPAR-H та потребою в контекстно-адаптивному НМІ й тренажерних сценаріях для практики критичних рішень [194, 195].

В рамках розробки DSS-модуля для DPRA, важливою є здатність класифікувати дії оператора DPO на основі поточного стану системи та реакцій на надзвичайні ситуації. Один з ключових випадків це високе навантаження на рушій (>95%) в поєднанні з активною тривою від DP-системи.

На рис. 3.2 подано дерево логіки DSS, яке аналізує реакції DPO, присвоюючи їм відповідні мітки ризику: успішна дія, пасивний ризик або критична помилка.

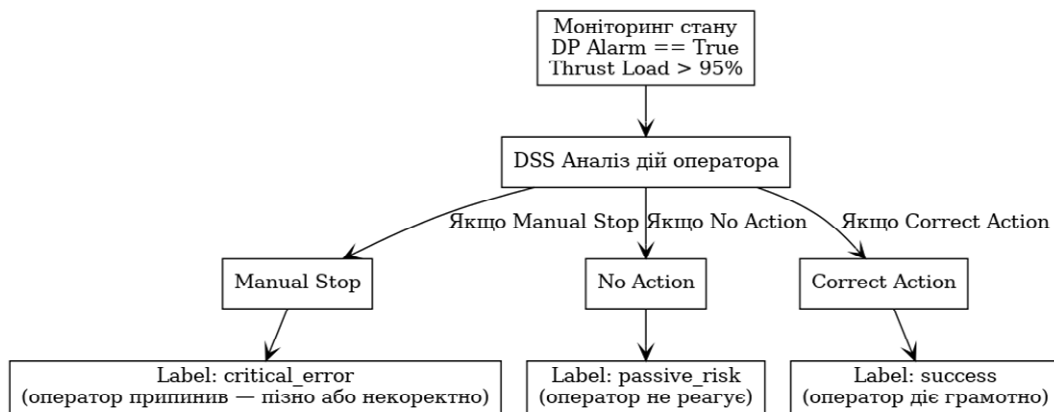


Рис. 3.2 - Логіка DSS-аналізу реакції DPO при перевантаженні рушія

На основі сформованого дерева рішень система підтримки прийняття рішень (DSS) ідентифікує три ключові поведінкові траєкторії оператора DPO: (1) примусове припинення дій у штатній ситуації (Manual Stop → critical_error), що може свідчити про хибну інтерпретацію технічного стану; (2) бездіяльність у контексті зростаючого ризику (No Action → passive_risk); (3) коректне, регламентоване реагування відповідно до ASOG (Correct Action → success). Такий підхід дає змогу DPRA-моделі:

- формалізувати поведінкові патерни як базові події в структурі сценарного аналізу;

- кількісно враховувати вплив людського фактору на зміну ризикового профілю системи;
- реалізовувати адаптивну логіку DSS із функціональністю попереджень та рекомендацій щодо подальших дій оператора [196-198].

Діаграма на рисунку 3.3 уточнює DSS-логіку при конфлікті між thrust-demand та thrust-feedback, фрагмент є розширенням логіки DSS і служить основою для тренажерного навчання та сценарного DPRA-аналізу.

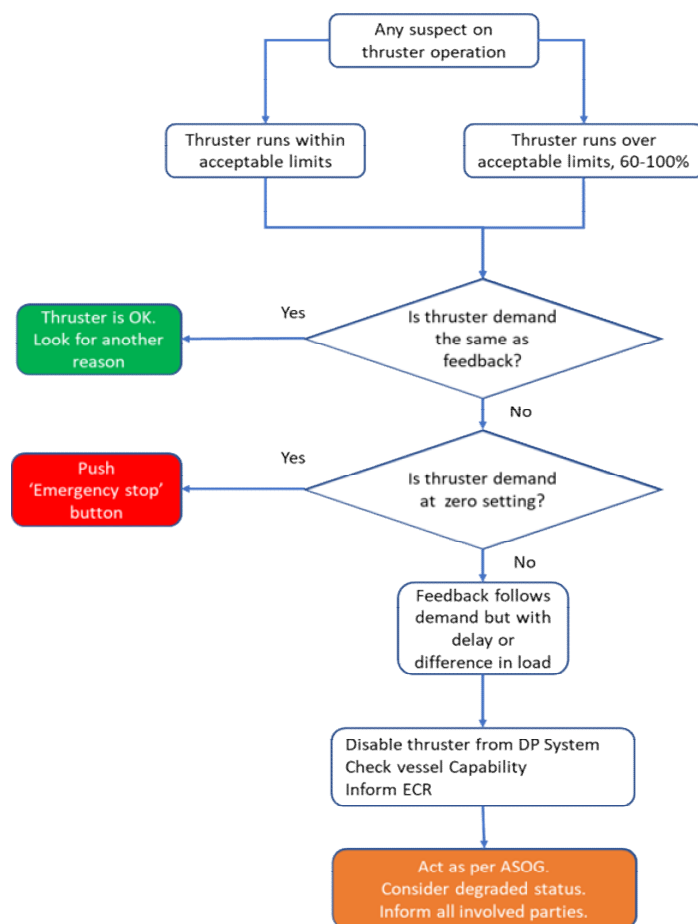


Рис. 3.3 - Алгоритм прийняття рішення DPO при аномалії навантаження рушія (інтеграція ASOG-протоколу)

Алгоритм дій базується на структурі ASOG (Activity Specific Operating Guidelines) і дозволяє оператору DPO інтерпретувати ситуацію в залежності від

стану відгуку та встановленого значення тяги. Випадки, коли $\text{thrust} = 100\%$, але feedback відповідає demand , трактуються як штатні і система рекомендує шукати інші причини. Натомість, якщо значення не відповідають або дорівнюють нулю, рекомендується негайне ручне втручання через Emergency Stop. Завершальний блок формує рекомендацію відповідно до ASOG та ініціює комунікацію з іншими модулями системи.

Для оцінки ймовірності виникнення та потенційної небезпеки реакцій оператора DPO у контексті морських операцій використано метод еволюційного генерування сценаріїв на основі частинок (Particle Swarm Optimization, PSO). Такий підхід дозволяє автоматично ідентифікувати комбінації подій, що з високою імовірністю можуть призводити до критичних наслідків у разі неправильного або затриманого реагування. Із 5376 згенерованих варіантів було виокремлено сценарії, що демонструють максимальну концентрацію ризикових чинників на рівні взаємодії технічних і поведінкових компонентів [199].

Таблиця 3.2 - Приклади критичних сценаріїв, отриманих у результаті PSO-аналізу

№	Інтервал 1	Інтервал 2	Інтервал 3	Інтервал 4
1	Сигнал тривоги	Автозупинка	Зміна точки відліку	Збій ручного утримання
2	Сигнал тривоги	Автозупинка	Перекалібрування	Збій ручного утримання
3	Втрата зв'язку	Автозупинка	Невірна інтерпретація	Ручне блокування рушія

Комбінація «ручне утримання після автоматичної зупинки» виокремлюється як сценарій із високим ризиковим потенціалом, зумовленим ймовірною втратою сталого керування судном. Ця ситуація демонструє критичну точку перетину між автономними реакціями системи та ручним втручанням оператора, що створює передумови для стратегічного конфлікту у процесі управління. Урахування таких сценаріїв є необхідною умовою для

удосконалення архітектури DSS і побудови повноцінної DPRA-моделі з акцентом на поведінкову варіативність у складних динамічних умовах [200, 201].

На рисунку 3.4 представлено узагальнену схему процесу прийняття рішень оператором у надзвичайній ситуації. Ця схема ілюструє послідовність ключових етапів: виявлення події, діагностика ситуації, формування рішень та їх реалізація. Процес починається з ініціюючої події, після чого оператори (або система підтримки рішень) ідентифікують наявність відхилень або порушень, виконують діагностичний аналіз причин, формують варіанти рішень на основі поточного контексту, і здійснюють вибір та виконання дій.

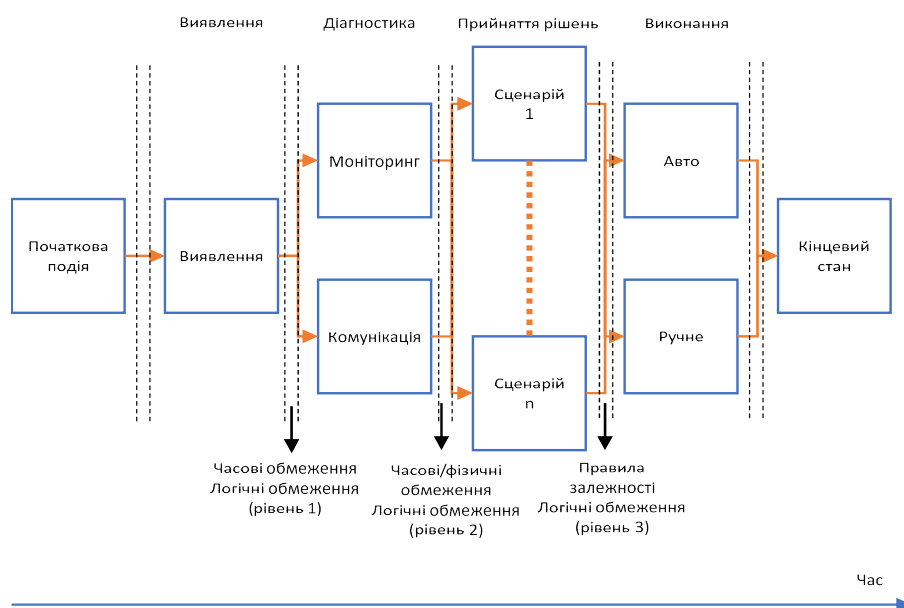


Рис. 3.4 - Схема потоку подій для прийняття рішень в надзвичайній ситуації

Вказаний підхід відповідає типовому циклу поведінки людини в керуванні складними технічними системами в умовах невизначеності та часових обмежень. Схема є спрощеною адаптацією моделі IDAC (Information, Decision and Action in Context), що широко використовується у дослідженнях людино-машинної взаємодії в контексті ядерної, морської та авіаційної безпеки [191,

192]. Перші два блоки на схемі це виявлення та діагностика - відображають редуковану модель процесу фільтрації інформації, під час якої оператор отримує сенсорну інформацію, фільтрує її на релевантність і на основі патернів формує діагностичне уявлення про ситуацію.

Для ефективного аналізу ризиків у DP-сценаріях необхідно не просто знати, що сталося, а розуміти динамічну послідовність дій оператора DPO у реальному часі. Такий підхід реалізується у форматі DESD (Dynamic Event Sequence Diagram), схеми, яка дозволяє описати:

- розвиток події від моменту її ініціації;
- поетапне виявлення та діагностику;
- формування рішення;
- вибір та реалізацію конкретної дії (автоматичної чи ручної).

На рис. 3.5 наведено DESD-модель поведінки оператора в умовах аварійної ситуації на DP-судні.

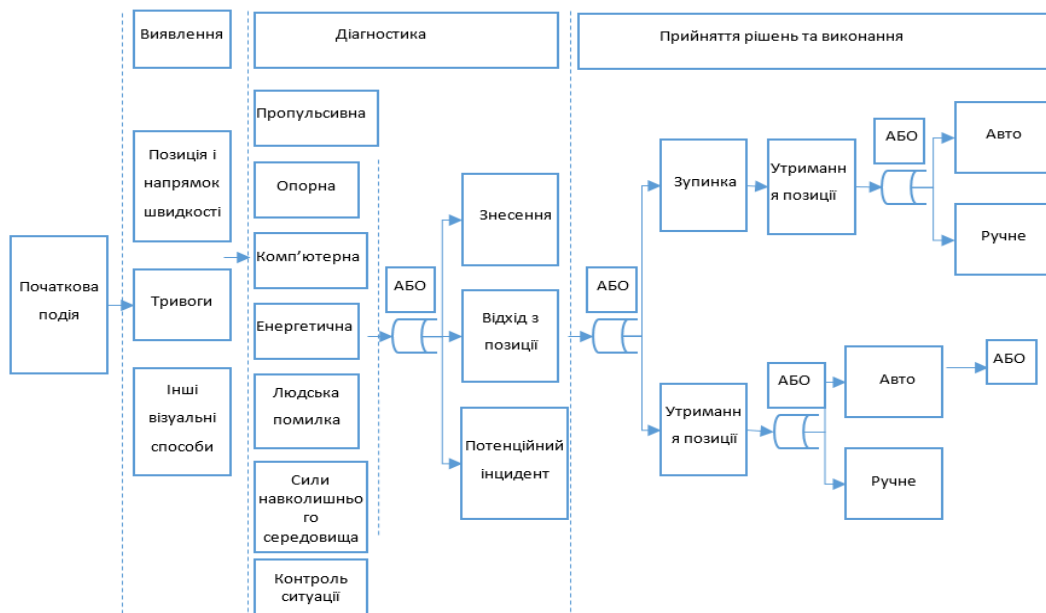


Рис. 3.5 - Динамічна діаграма послідовності дій DPO у надзвичайній ситуації (DESD)

Розроблена DESD-модель (Decision-Event-State Diagram) формалізує послідовну логіку поведінки оператора DPO, розподілену на три ключові функціональні блоки:

1. Виявлення - первинна ідентифікація аномалій на основі сенсорних даних, сигналізацій, візуального спостереження або аналізу параметрів руху (позиції, швидкості).

2. Діагностика - класифікація причин ситуації з урахуванням технічних (відмова рушіїв, збій ПЗ, втрата живлення), людських або зовнішніх чинників.

3. Прийняття рішення та виконання - вибір стратегії дій (зупинка, утримання позиції) з визначенням режиму реалізації (автоматичний чи ручний).

Така структурна модель є фундаментальною для сценарного моделювання у рамках методології DPRА, розроблення адаптивних, контекстно чутливих алгоритмів DSS, створення навчальних модулів із фіксацією переходів між фазами нормального та аномального функціонування. Кожен зв'язок між елементами на діаграмі інтерпретується як потенційна траєкторія розвитку сценарію, що може бути використана для генерації поведінкових моделей за допомогою методів PSO або CREAM [202-204].

Після виявлення надзвичайної ситуації, проходження фази діагностики та вибору стратегії, DPO виконує комплекс дій по стабілізації або відновленню позиції. Від правильності цього етапу залежить не тільки повернення судна у безпечний стан, а й уникнення зіткнень, обривів або повної втрати DP-режиму.

На рис. 3.6 зображено логіку завершального етапу прийняття рішення DSS та реалізації відновлювальних дій із чіткою класифікацією результатів: утримання, безпечна зупинка або збій.

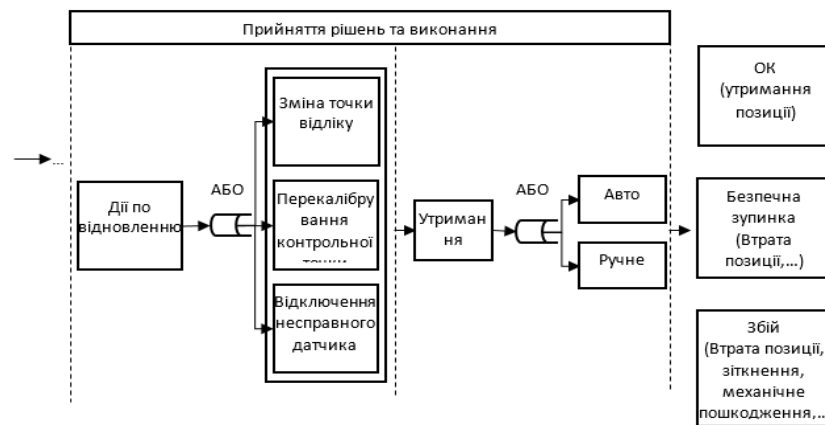


Рис. 3.6 - Варіанти реалізації та результатів рішень DPO після відновлювальних дій

Модель описує типові траєкторії дій оператора, що виникають у відповідь на виявлену аномалію, зокрема: виконання відновлювальних процедур (зміна точки відліку, перекалібрування, відключення дефектного сенсора); ініціація режиму утримання позиції з вибором між автоматизованим і ручним управлінням. Кожна траєкторія завершується одним із трьох типових результатів: утримання позиції без порушень, мінімізація ризику, безпечна зупинка - втрата позиції без настання критичних наслідків і збій та втрата керування, що супроводжується пошкодженням або подією з елементами інциденту.

У контексті моделювання DPRA, ці кінцеві стани формують фінальні гілки дерева сценаріїв, у яких вибір дій оператором DPO має вирішальний вплив на категоризацію ризику. Така структура дозволяє прогнозувати можливий результат на основі прийнятих оператором рішень, застосовувати адаптивні DSS для навчання та корекції поведінкових шаблонів та інтегрувати тренажерні модулі для оцінки та тестування реакцій у межах кожної сценарної гілки [205-207].

Щоб алгоритмічна модель DPRA могла якісно прогнозувати поведінку DPO, необхідно оцінювати ймовірності проходження кожного етапу прийняття

рішень у надзвичайній ситуації. У цій роботі, на основі результатів тренажерного моделювання, побудовано розподіли ймовірностей для шести ключових стадій: виявлення, діагностика, прийняття рішення, виконання, зупинка та виконання зупинки.

Як представлено на гістограмах на рис. 3.7, для більшості етапів розподіл є правобічно зміщеним тобто оператори здебільшого проходять ці фази успішно (ймовірність близька до 1.0), але існує невелика, але критична кількість сценаріїв, де фаза не виконується (ймовірність ≈ 0).

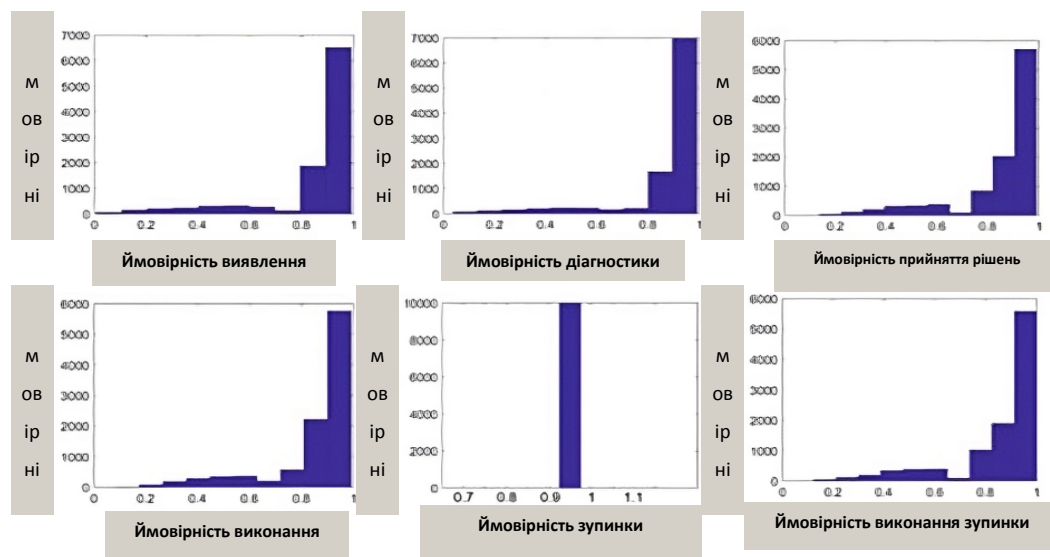


Рис. 3.7 - Розподіли ймовірностей ключових фаз поведінки DPO у критичних DP-сценаріях

Аналіз розподілу ймовірностей ключових фаз прийняття рішень оператором дозволяє виявити характерні особливості кожного етапу. Зокрема, ймовірність ініціації зупинки виявляє чітко виражений пік у вузькому діапазоні значень, що вказує на бінарну природу цього рішення оператор або ухвалює зупинку, або ні, без проміжних варіантів. Натомість ймовірність діагностики демонструє ширший розподіл, що свідчить про можливу неоднозначність у визначенні причин ситуації або про варіативність у способах інтерпретації

сигналів. Найбільш розмитим є розподіл ймовірності фактичного виконання зупинки, що, ймовірно, пов'язано з нерішучістю, зовнішніми обмеженнями або конфліктом між запропонованими діями системи і власною оцінкою оператора.

Ці параметри можуть бути інтегровані до моделей DPRA як вагові коефіцієнти базових подій, що відображають поведінкову невизначеність. Вони також можуть бути використані для перевірки ефективності рекомендацій, які формує система підтримки прийняття рішень (DSS), а також для динамічного оцінювання рівня довіри до оператора з боку системи в реальному часі, з урахуванням контексту та попередньої поведінки [208-210].

DPRA не лише аналізує послідовність дій DPO, а й має передбачати кінцеві наслідки цих дій: чи буде утримано позицію, чи спрацює зупинка, чи відбудеться механічне пошкодження. На основі симуляцій створено розподіли ймовірностей трьох ключових результатів тобто успішне утримання позиції (OK), безпечна зупинка та механічне пошкодження, рисунок 3.8.

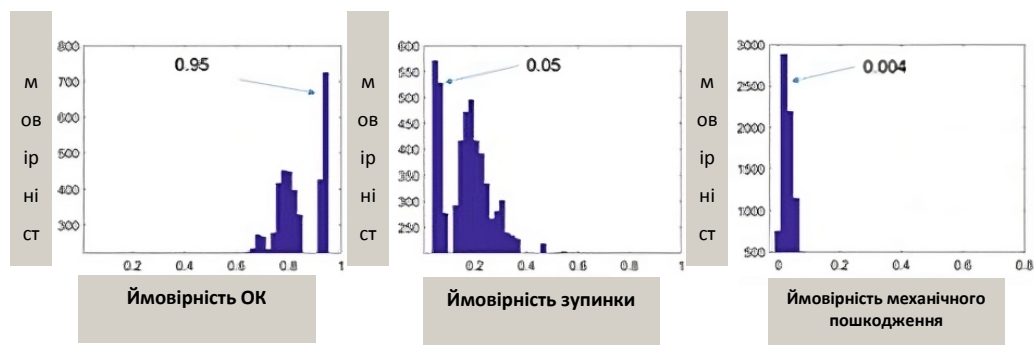


Рис. 3.8 - Ймовірність результатів сценарію DPO в системі DPRA

Аналіз отриманих ймовірностей демонструє високий рівень ефективності системи за умови коректного виконання оператором усіх регламентованих дій: успішне утримання позиції фіксується у 95% випадків. Це підтверджує здатність DSS забезпечувати підтримку у складних ситуаціях за наявності правильної поведінкової реакції. У 5% сценаріїв реалізується перехід до режиму безпечної зупинки, що хоча й супроводжується втратою позиції, однак не веде

до серйозних наслідків. Критичні події, що завершуються зіткненням або механічним пошкодженням, фіксуються лише у 0.4% випадків, що дозволяє вважати їх статистично рідкісними, але стратегічно значущими для ризик-орієнтованої оцінки.

Час реагування є не менш критичним за сам факт дії. Затримка навіть у кілька секунд на ранньому етапі може призвести до неможливості зупинки або до неконтрольованого дрейфу.

На рис. 3.9 представлено часові розподіли шести фаз: виявлення, діагностика, прийняття рішення, виконання сценарію, зупинка та виконання зупинки.

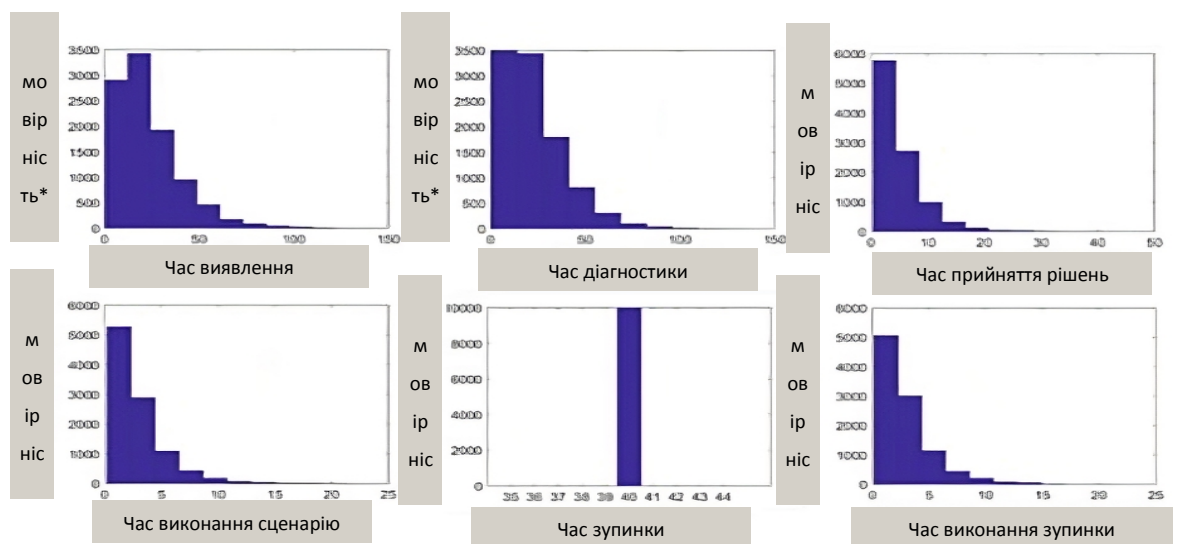


Рис. 3.9 - Розподіл часу на ключові фази реагування DPO

Аналіз тривалості ключових фаз операційної реакції DPO дозволяє виявити структурні особливості процесу прийняття рішень у критичних ситуаціях. Найбільше часу займають етапи виявлення та діагностики, тривалість яких може перевищувати 100 секунд, що пояснюється складністю сенсорної обробки та багатофакторністю причинних зв'язків. Натомість власне прийняття рішення зазвичай вкладається у часовий інтервал 5-15 секунд, що свідчить про

відносну готовність оператора діяти після формування оцінки ситуації. Фаза реалізації зупинки демонструє високу стабільність або середній час становить приблизно 40 секунд із незначним відхиленням, що вказує на добре формалізовану технічну процедуру.

Отримані розподіли є критично важливими для кількох напрямів практичного застосування. По-перше, вони використовуються для встановлення часових меж у сценаріях DPRA, зокрема відповідно до вимог ASOG, де точність прив'язки до етапів часу визначає допустимість сценарію. По-друге, ці значення впливають на дизайн інтерфейсів DSS: система повинна забезпечити виведення критичної інформації в інтервалі менше 10 секунд, аби оператор мав змогу адекватно зреагувати. І нарешті, часові еталони застосовуються у тренажерних середовищах для калібрування моделей операторської поведінки та оцінки відповідності реакцій нормативним очікуванням.

3.2 Тренажерні сценарії та аналіз реакцій DPO в умовах ризику

Реальні інциденти в DP-системах свідчать: навіть при повній справності техніки основним джерелом ризику залишається людський фактор. Оператор DP (DPO) стикається з необхідністю приймати рішення в умовах інформаційного перевантаження, суперечливих сигналів та обмеженого часу.

Для оцінки якості таких рішень, їх варіативності та впливу на систему було розроблено тренажерний симуляційний модуль, що дозволяє відтворювати аварійні сценарії, спостерігати поведінку DPO та вбудовувати реакції в модуль DPRA.

Архітектура тренажера побудована з урахуванням потреб моделювання операторської поведінки та тестування системи підтримки прийняття рішень у середовищі з підвищеним рівнем невизначеності. Структура включає кілька функціонально ізольованих, але інтегрованих компонентів:

Scenario Generation Block відповідає за створення варіативних сценаріїв із використанням симуляції відмов, конфліктів сенсорних даних та збоїв у системах управління. Це дозволяє перевірити реакції DPO у змінних та стресових умовах.

DPO Interface це спрощене HMI-середовище, яке імітує ключові елементи управління: контроль тяги (thrust), напрямку руху (heading) та ведення журналу тривог (alarm log). Інтерфейс орієнтований на швидке реагування без перевантаження другорядною інформацією.

Reaction Logging Module фіксує всі дії оператора, включаючи час реакції, натискання елементів управління, зміни станів і переходи між режимами. Це дозволяє формувати повноцінний цифровий слід для подальшого аналізу.

DSS Monitor є окремим інструментальним екраном, що надає оператору підказки та системні рекомендації. Цей блок може бути активованим або вимкненим, що дозволяє оцінити, як наявність DSS впливає на прийняття рішень у різних сценаріях. Така модульна архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість порівняльного аналізу реакцій DPO з та без DSS-підтримки.

Для системного аналізу операторської поведінки в умовах відмов та інформаційних суперечностей було реалізовано серію тренажерних вправ, які моделюють типові та ускладнені ситуації експлуатації DP-системи. Кожна вправа містить індивідуальний набір симульованих відмов та очікуваних реакцій оператора (DPO), зокрема, активацію аварійної зупинки, перехід до ручного керування або проведення діагностики. Ці сценарії реалізуються в рамках DSS-тренажера з фіксацією всіх дій користувача та результатів для подальшого аналізу у контексті DPRA, рисунок 3.10.

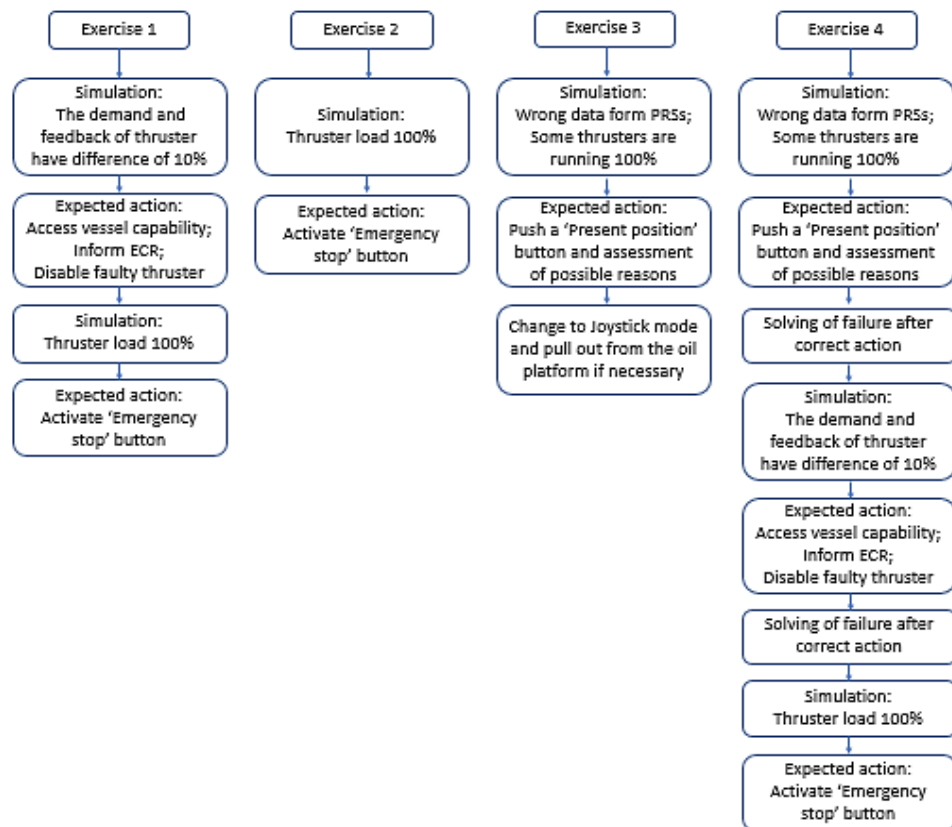


Рис. 3.10 - Структурна схема DSS-тренажера для моделювання поведінки DPO

Представлена блок-схема охоплює чотири послідовні вправи, які моделюють критичні ситуації:

1. Exercise 1 демонструє конфлікт між запитом і відгуком тяги. Оператор повинен оцінити можливості судна, повідомити ECR і відключити несправний рушій. Якщо проблему не вирішено, слід активувати Emergency Stop.

2. Exercise 2 спрощує сценарій, де з першого етапу необхідно вжити заходів при 100% завантаженні рушія, без попереднього діагностичного етапу.

3. Exercise 3 ускладнює ситуацію: дані з PRS є некоректними, а деякі рушії працюють на повну потужність. Очікується активація Present Position, оцінка причин, перехід до Joystick mode і відхід від платформи при необхідності.

4.Exercise 4 комплексний сценарій із багатоступеневою логікою: неправильні дані PRS, оцінка ситуації, діагностика, обробка помилок, повторне виникнення відмови, подальше реагування аж до Emergency Stop.

Ці сценарії дозволяють DSS-моделі фіксувати варіативність рішень, помилки, затримки та ефективність реакцій DPO на різних етапах. Вони також становлять основу для адаптивного налаштування системи підказок, тренажерних еталонів часу та побудови DPRA-гілок з урахуванням поведінкових параметрів.

У межах реалізації тренажерної системи було сформовано чотири ключові сценарії, кожен з яких базується на типових аварійних або порушених ситуаціях, зафіксованих у реальній практиці експлуатації DP-суден. Сценарії охоплюють широкий спектр потенційних збоїв, від ізольованих технічних несправностей до складних комбінацій з елементами інформаційної неоднозначності. Метою моделювання є оцінка своєчасності, адекватності та послідовності реакцій оператора (DPO) у рамках структурованих протоколів, зокрема ASOG, а також аналіз взаємодії з системою підтримки прийняття рішень (DSS).

Таблиця 3.3 - Тренажерні сценарії моделювання надзвичайних ситуацій

№	Сценарій	Тип події	Очікувана реакція DPO
1	Рушій має 10% розбіжність по потужності	Асиметрія thrust	Перевірка ASOG, оцінка здатності судна, відключення несправного рушія
2	Один з рушіїв переходить у режим 100% thrust	Потенційне перевантаження	Перехід у ручний режим або оцінка через ASOG-панель
3	Вихід PRS з ладу + 100% thrust	Подвійна відмова	Зміна reference point, активація Joystick, корекція Mode
4	Стабілізація після втручання	Відновлення	Підтвердження стабільного стану, повернення до автоматичного режиму

Сценарії дозволяють DSS-моделі фіксувати закономірності поведінки оператора, а також підтримують побудову DPRA-структур через формалізацію базових подій та результатів. Усі дії реєструються в модулі логування з прив'язкою до часу, що дає змогу проводити подальший кількісний аналіз та тренування DPO в умовах симульованого ризику.

Перший сценарій відтворює ситуацію, коли один з рушіїв показує відхилення потужності на 10%, що потенційно вказує на асиметричне навантаження або локальну несправність. Задача DPO виявити проблему через ASOG або thrust display, оцінити стабільність системи, повідомити машинне відділення та прийняти рішення про вимкнення або збереження роботи рушія, рис.3.11.

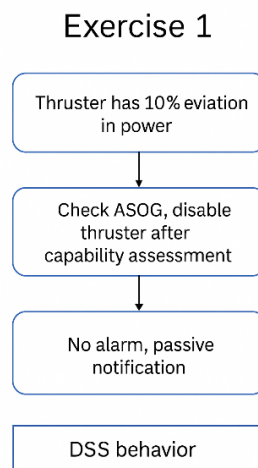


Рис. 3.11 - Алгоритм дій DPO при виявленні розбіжності потужності рушія на 10 %

Аналіз сценарію виявлення незначної асиметрії потужності (10%) демонструє базовий механізм реагування з боку оператора DPO. Очікуваною поведінкою є перевірка ASOG і відключення рушія лише після оцінки залишкових можливостей судна. Відповідно до моделі DSS, у цьому випадку формується пасивне повідомлення без активації тривожної сигналізації, що стимулює оператора самостійно провести аналіз до прийняття рішення.

Найпоширеніші помилки, виявлені у цьому сценарії це надмірна реакція тобто передчасне вимкнення технічно справного рушія без проведення належної оцінки через ASOG, що може знизити маневреність судна у подальшій ситуації. Інша помилка це ігнорування проблеми або відсутність будь-якої реакції, що потенційно призводить до поступового накопичення похибки позиціонування та зростання ризику відмови.

Сценарій моделює перевантаження одного з рушіїв до 100% thrust, що часто трапляється в реальних умовах при штормі, течіях, або автоматичній компенсації. DSS очікує, що DPO зреагує через ASOG/DP-панель, перевірить інші рушії, а не одразу натисне Emergency Stop, рис. 3.12.

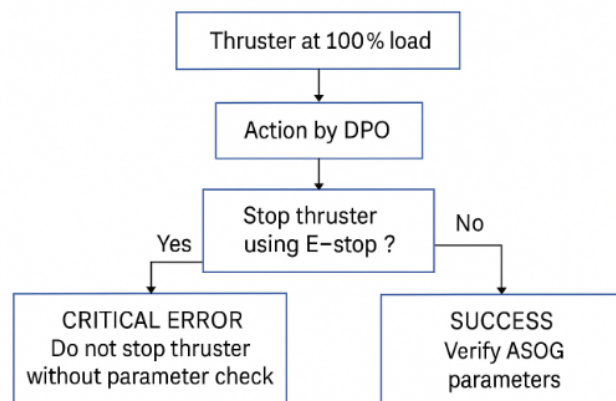


Рис. 3.12 - Алгоритм реакції DPO на thrust = 100% у DSS-сценарії

Аналіз тренажерних сценаріїв засвідчив, що у 17% випадків оператор (DPO) ініціює аварійну зупинку (Emergency Stop) без попередньої оцінки параметрів, навіть коли система залишається в межах допустимої стабільності. Така поведінка класифікується як надмірне втручання, що у рамках методології DPRA розглядається як критична базова подія, яка може штучно знизити загальні можливості судна до маневрування або спровокувати втрату позиції. Щоб знизити імовірність необґрунтованих дій, рекомендовано впровадити механізм автоматичного DSS-повідомлення, що спрацьовує при виявленні пікових значень thrust у поодиноких рушіях.

Сценарій на рисунку 3.13 моделює складну ситуацію: відмова PRS (Position Reference System) у поєднанні з $\text{thrust} = 100\%$. Це типовий інцидент, який у реальних умовах може призвести до втрати позиції, якщо DPO не переключиться на альтернативний reference point або не активує Joystick Mode.

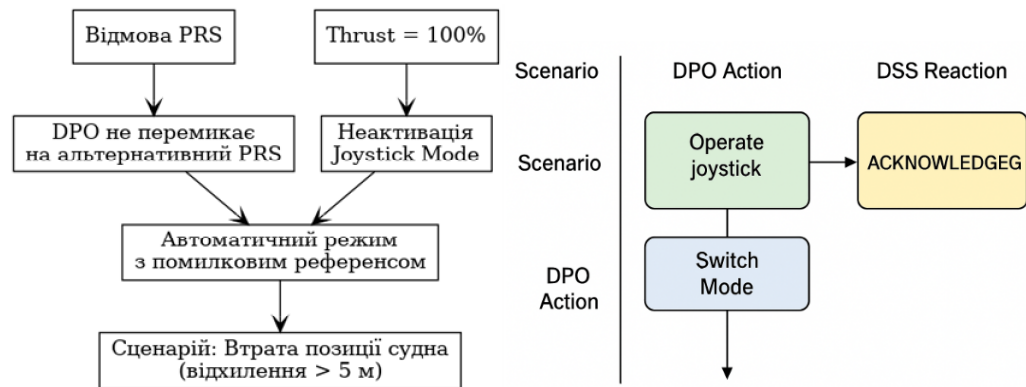


Рис. 3.13 - Сценарій подвійної відмови: PRS + thrust = 100 %

Наведений сценарій ілюструє ситуацію подвійної відмови: вихід з ладу Position Reference System (PRS) у поєднанні з максимальним навантаженням одного з рушіїв ($\text{thrust} = 100\%$). У подібних умовах критично важливою є своєчасна реакція оператора, зокрема переведення системи у ручний режим (Joystick) та корекція точки позиціонування [212].

Найбільш поширеною помилкою у цьому сценарії є залишення судна в автоматичному режимі, незважаючи на втрату достовірності позиційної інформації. Це призводить до фальшивої стабілізації, система продовжує підтримувати положення на основі некоректних PRS-даних, що створює ілюзію контролю при фактичному зсуві.

З точки зору DPRA, даний випадок моделюється як високоризиковий комбінований сценарій, у якому поєднуються два вузли дерева відмов: "відмова PRS" та "неперехід в режим Joystick". Їхня комбінація призводить до наслідку типу "відхилення траєкторії понад 5 метрів", що є граничним порогом стабільності у більшості DP-систем. Такі ситуації мають бути враховані при

формуванні підказок DSS, а також у структурі тренажерного навчання для запобігання хибному утриманню позиції [213].

Сценарій на рисунку 3.14 відтворює поведінку системи та DPO після стабілізації: чи буде відновлена позиція, чи система повернеться до Mode 1/2, чи буде потрібна зупинка. Тут оцінюється послідовність дій DPO при переході до “нормального” стану.

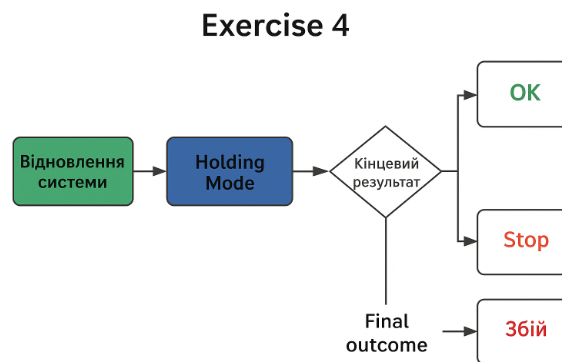


Рис. 3.14 - Алгоритм відновлення після втручання DPO в DP-системі

Сценарій відтворює критичну фазу після втручання оператора в роботу DP-системи до етапу відновлення. На цьому етапі оцінюється, чи система здатна повернутися до стабільного режиму (Mode 1/2), чи буде необхідна зупинка, або ж можливо утримати позицію без подальшого втручання. Особлива увага приділяється послідовності дій DPO, включно з перевіркою параметрів, діагностикою та фіксацією нового «reference point».

Аналіз результатів тренажерних запусків показав, що однією з найпоширеніших проблем є відсутність оновлення точки відліку після стабілізації або залишкова сенсорна помилка, яка не була виявлена. Це, у свою чергу, призводить до повторної втрати позиції або хибної оцінки стану судна, попри зовнішню стабільність.

У рамках DPRA-моделі даний сценарій включено як розгалуження дерева після фази "втручання оператора", де кінцеві стани класифікуються як:

«утримано» коли позиція відновлена, системні помилки усунені; «безпечна зупинка» коли втрачено позицію, але без пошкоджень або зіткнень; «збій» та подальше накопичення помилок, що призводить до катастрофічного сценарію (наприклад, механічного пошкодження або втрати контролю) [214].

Цей сценарій має ключове значення для оцінки ефективності DSS у фазі післякризового відновлення, коли необхідно не лише стабілізувати ситуацію, а й коректно завершити цикл взаємодії людина-машина всі чотири діаграми інтегруються в DPRA як окремі гілки сценарного дерева, де DPO - ключовий інтерфейс ризику.

У межах дослідження всі чотири тренажерні сценарії були протестовані 12-ма операторами з різним рівнем сертифікації (від базового до DP Unlimited). Усі сеанси були записані з використанням log-файлів, що дозволило здійснити повноцінний аналіз поведінки в динаміці. Загалом зафіксовано 143 унікальні реакції, які були класифіковані за ефективністю, точністю та взаємодією з DSS-системою.

Таблиця 3.4 - Зведений аналіз реакцій DPO по сценаріях

Показник	Exercise 1	Exercise 2	Exercise 3	Exercise 4
Середній час реакції, с	16.4	11.3	14.7	12.9
Частка правильних дій, %	72%	83%	67%	91%
Кількість критичних помилок	3	2	4	0
Частка використання DSS-підказок	35%	61%	28%	74%

Поведінкові закономірності полягають в тому, що на рис. 3.12 подано частотний розподіл реакцій операторів при умовах максимального thrust (100%). Найбільш типовою помилкою виявлено зайву активацію кнопки Emergency Stop, яка траплялась у 17% випадків навіть без підтверджених відмов або

критичних сигналів. Це свідчить про тенденцію до надмірного втручання при відсутності чіткої ситуаційної оцінки.

Втім, на рис. 3.13 продемонстровано відсоток помилок при одночасному конфлікті сенсорних даних (збій PRS у поєднанні з thrust = 100%). Найвищий показник помилок в 33%, спостерігався саме у цьому поєднанні, що підтверджує підвищену когнітивну складність обробки комбінованих аномалій. У таких випадках особливо важливою є наявність DSS-підказок, адаптованих до мультифакторного аналізу [215].

Результати тренажерного моделювання підтвердили ключову гіпотезу, закладену в основу підходу DPRA: людський фактор, зокрема поведінка оператора DPO, є провідним джерелом варіативності ризику навіть за ідентичних технічних умов системи. Попри однакові сценарії відмов, саме стиль реагування, час ухвалення рішення та послідовність дій операторів визначають остаточний ризиковий профіль ситуації. Найбільш характерні помилки були пов'язані з емоційним або автоматизованим реагуванням без проведення первинної діагностики, що особливо яскраво проявилось у 17% випадків, де фіксувалось необґрунтоване вимкнення рушія або активація Emergency Stop без підтвердження фактичної відмови [216].

Сценарії з комбінованими аномаліями, зокрема поєднання відмови PRS із максимальним thrust (100%), продемонстрували найвищу частоту критичних помилок до 33%, що вказує на когнітивне перевантаження DPO при необхідності одночасного аналізу декількох каналів інформації. При цьому модуль DSS виявив здатність зменшувати частоту ризикових реакцій, особливо на етапах відновлення після первинного втручання, де спостерігалось підвищення частки правильних дій за наявності системних підказок. Усі зафіксовані реакції були успішно формалізовані як базові події у структурі DPRA, що дає змогу інтегрувати ці дані у моделі автоматизованої генерації

сценаріїв та подальше тренування DSS із урахуванням поведінкової динаміки оператора.

3.3 Проблеми та обмеження впровадження онлайн-оцінки ризиків у DP-системах

Онлайн-оцінка ризиків у системах динамічного позиціонування (DP) це не просто аналітична процедура, а фундаментальний зсув у підходах до безпеки експлуатації судна. Вона дозволяє перейти від статичних методів аналізу (PRA, FMEA) до інтерактивних, самоналаштовуваних механізмів, які прогнозують розвиток ситуації в реальному часі, підтримують DPO у прийнятті рішень, і, найголовніше, дозволяють виявити та попередити ризики до того, як вони ескалюють в аварію.

Проте впровадження таких моделей, зокрема у форматі DPRA (Dynamic Probabilistic Risk Assessment), супроводжується серією суттєвих технічних, поведінкових і алгоритмічних бар'єрів. Особливо критичними є:

- нестабільність вхідних потоків даних;
- затримки при обробці сценаріїв у режимі реального часу;
- обмеження когнітивного навантаження оператора (DPO);
- інтерфейсна “непрозорість” DSS-рішень.

У цьому параграфі систематизовано основні виклики, які ускладнюють або блокують впровадження онлайн-версій DPRA у системах судна. Аналіз базується на результатах моделювання, DSS-розробки, а також тренажерних сценаріях з попередніх розділів [217].

Одним із фундаментальних технологічних викликів для реалізації DPRA у реальному часі є забезпечення стабільного, синхронізованого та безперервного збору багатоканальних вхідних даних, необхідних для поточної оцінки ризику.

Умови експлуатації морських DP-систем передбачають надходження критичних параметрів із широкого спектра джерел, серед яких:

- сенсорні підсистеми позиціонування (PRS, DGPS, USBL);
- системи управління рушіями (thruster control units);
- погодні сервіси та морські прогнози;
- системи контролю натягу троса;
- блоки резервного живлення;
- аварійні сигнальні лінії (alarm log events) тощо.

У теоретичному контексті системи підтримки прийняття рішень (СППР), що функціонують у режимі реального часу, передбачають формування динамічного ситуаційного профілю, здатного оновлюватися з частотою від однієї до десяти секунд. Такий рівень оперативності необхідний не лише для актуалізації моделей ризику, але й для забезпечення здатності СППР своєчасно реагувати на зміну зовнішніх і внутрішніх умов, генерувати попередження або адаптувати власну логіку поведінки [218].

Однак у реальних умовах реалізація такого режиму стикається з низкою суттєвих технічних обмежень. Основними з них є відсутність єдиного стандарту передачі даних між різними системними компонентами, затримки у мережевій інфраструктурі, нестабільність каналів комунікації, а також відсутність глобальної синхронізації за часом між джерелами даних. У результаті система може отримувати на вигляд валідні, але фактично несвоєчасні або суперечливі дані, які не відповідають реальному стану судна чи поточній ситуації в морському середовищі, що істотно ускладнює точну оцінку ризиків та коректну реакцію, (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Основні джерела даних для DPRA та їх обмеження в онлайн-режимі

Джерело	Частота оновлення	Потенційна затримка	Основна проблема
PRS (DGPS, USBL)	1–10 Гц	0.3–1 с	Пропуски сигналів, шум, затінення
Системи тяги (Thrust)	5–10 Гц	~0.2 с	Перевантаження, відсутність редундантності
Система живлення	1 Гц	1–5 с	Асиметричне навантаження, сигнали не встигають
Моніторинг троса	<1 Гц	до 15 с	Інтермитентність, ручний ввід
Alarms / DP Log	Подія	залежить	Немає уніфікованої структури

Результати аналізу таблиці 3.5 свідчать про відсутність серед доступних каналів збору інформації таких, що відповідали б критеріям повної безперервності, високої точності та надійної часової узгодженості вимог, які є принципово важливими для коректного функціонування DPRA-моделі в режимі реального часу. Особливу вразливість у цьому аспекті демонструють сигнали від систем позиціонування (PRS), що характеризуються нестабільністю у ситуаціях зміни орієнтації антени або при наявності просторових перешкод. Такі умови, як правило, виникають поблизу мобільних бурових платформ (MODU), а також у прибережних регіонах із фрагментованою лінією горизонту, де сигнал піддається частковому екрануванню або багатошляховому поширенню. У подібних випадках існує суттєвий ризик втрати достовірних координат навіть за умови стабільного функціонування інших підсистем, що призводить до формування хибної оцінки положення судна і, відповідно, некоректної динаміки дерева сценаріїв ризику [219, 220].

Джерелом нестабільності системи є також параметри натягу кабелю, які в багатьох випадках не отримуються в режимі реального часу, а вводяться вручну

або через проміжні джерела (проксі-модулі). Така практика унеможливорює оцінку операційного ризику на основі фактичного навантаження та порушує загальний темп актуалізації ситуації. Крім того, навіть за наявності технічно справних каналів, проблема часового лагу залишається критичною: якщо хоча б одне ключове джерело має затримку більше 3-5 секунд, алгоритми DSS не встигають обробити зміни, що, в свою чергу, призводить до прийняття рішень, заснованих на застарілих або неповних даних.

Все це підкреслює необхідність технологічного переосмислення того, як вхідні сигнали інтегруються в СППР. Зокрема, необхідно розставити пріоритети джерел залежно від їхньої надійності та критичності, запровадити локальну буферизацію для згладжування асинхронних потоків даних, а також присвоїти кожному джерелу динамічний коефіцієнт ймовірності, як це передбачено в байєсівських адаптаціях моделей СППР [221].

Невизначеність у DPRA: стохастична і гносеологічна складові. Невизначеність це фундаментальна характеристика кожної оцінки ризику, а особливо динамічної. У DPRA-просторі вона проявляється у двох основних формах:

- стохастична (алеаторна) невизначеність тобто випадкові флуктуації в зовнішньому середовищі або сенсорних даних, які не можна усунути, лише моделювати;

- гносеологічна (епістемічна) невизначеність, що виникає через брак або неточність інформації про саму систему, її конфігурацію чи стан.

Оцінка й мінімізація цих двох типів невизначеності своєрідний ключ до формування надійної DPRA-моделі, що працює в реальному часі (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 - Форми невизначеності у DPRA та їх наслідки для прийняття рішень

Тип невизначеності	Джерело	Приклад	Вплив на DPRA
Алеаторна (випадкова)	Збурення хвилі, вітер, течія	Відхилення позиції на 0.7–1.2 м	Ширше розподілення ризику, підвищення фоновому рівня
Сенсорна варіативність	PRS, трос, thrust-датчики	Стрибки thrust на 10–15%	Фальшиві тривоги, зниження чутливості DSS
Епістемічна	Невідома конфігурація рушіїв, троса	Тип зчеплення не оновлено вручну	Невірні обрахунки моменту, некоректні сценарії
Когнітивна	Поведінка DPO, помилки інтерпретації	Ігнорування alarm на сенсор PRS	Затримка у втручанні, DSS-інтерфейс недієвий

У контексті систем динамічного позиціонування (DP) невизначеність не є лише супутньою статистичною похибкою, вона виступає як активне джерело ризику, здатне чинити суттєвий вплив на рішення, навіть у технічно справній системі. Представлена класифікація у таблиці 3.6 демонструє, що природа невизначеності в DPRA-моделі багатошарова і включає як фізичні, так і людські аспекти. Алеаторна складова, пов'язана з природними збуреннями, такими як вітер, хвилювання або течії, зумовлює розширення імовірнісного профілю ризику навіть за відсутності внутрішніх відмов. Це створює фоновий ризик, який знижує поріг спрацьовування системи та ускладнює ідентифікацію істинних загроз [222].

Сенсорна варіативність, що виникає внаслідок нестабільності сигналів від PRS, thrust-датчиків або тросових систем, призводить до появи фальшивих або суперечливих сигналів. Класичний прикладом може бути стрибок «thrust» на 10-15% протягом кількох секунд, який може мати цілком різні наслідки залежно від джерела. Якщо це є фоновий шум, то оператор або DSS можуть проігнорувати його, що в нормі є допустимим але якщо ж ідеться про реальне фізичне навантаження, система має сформулювати попередження або втрутитись.

Поведінкові та організаційні бар'єри у впровадженні DPRA в реальному часі. Однією з найсуттєвіших перешкод для впровадження DPRA в режимі реального часу є людський фактор, що проявляється не лише у вигляді індивідуальних помилок, а й як системна поведінкова складова, яка суттєво впливає на надійність операційної взаємодії між людиною та автоматизованою логікою. Попри технічну досконалість DPRA-моделей, остаточне рішення часто залишається за DPO, оператором, який працює в умовах обмеженого часу, високої когнітивної напруги та невизначеності. Тренажерне моделювання, результати якого розглядалися у попередніх розділах, підтверджує, що навіть при наявності DSS-підказок реакції DPO демонструють значну варіативність, пов'язану не стільки з технічним рівнем, скільки з поведінковими та організаційними чинниками.

Типологізація цих обмежень дозволяє виявити чотири основні категорії а саме когнітивну, інтерпретаційну, організаційну та інтерфейсну. Кожна з них по-своєму модифікує логіку прийняття рішень і, у разі неправильного керування, може звести нанівець переваги DSS-алгоритмів. Нижче наведено зведену таблицю типових бар'єрів, їхніх проявів та можливих наслідків для роботи системи DPRA (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 - Поведінкові бар'єри впровадження DSS/DPRA в реальному часі

Категорія	Прояв	Приклад ситуації	Потенційний наслідок
Когнітивна	Перевантаження інформацією	Одночасні сигнали: PRS fault + thrust ↑	Ігнорування ключового тривожного сигналу
Інтерпретаційна	Неправильне трактування системи	“Ризик” → сприймається як “помилка”	Зниження довіри до DPRA або його відключення
Організаційна	Відсутність протоколу взаємодії	Немає правил дій у випадку “ASOG breach”	DPO приймає інтуїтивне рішення
Інтерфейсна	Незрозумілі DSS-виводи	Повідомлення без пояснення (“risk ↑”)	DPO не реагує, бо не розуміє сенсу

Усі наведені категорії мають не лише операційний, а й глибинний концептуальний вплив. Найбільш небезпечною є інтерпретаційна розбіжність у сприйнятті поняття “ризик”. Частина операторів розглядає його як ознаку вже наявної несправності, а не як попередження про зростаючу імовірність події. Унаслідок цього система DSS, яка повідомляє про ризик як про ймовірнісне відхилення, часто або ігнорується, або навпаки, сприймається як сигнал до негайного втручання без додаткового аналізу. Такий когнітивний зсув призводить до поведінкової асиметрії: дії DPO не відповідають градації ризику, а формуються на основі емоційної або інтуїтивної оцінки [223].

Яскравим прикладом є ситуація з «thrust» = 100% на одному з рушіїв. У тренажерних сценаріях фіксувалось дві основні реакції. Частина операторів залишалася у стабільному режимі, перевіряла ситуацію через ASOG і продовжувала моніторинг. Інша частина одразу ініціювала Emergency Stop. При цьому DSS видавало чіткий висновок: «thrust» вище 95% протягом понад 3 хвилин, слід вважати підвищеним ризиком, рекомендовано продовжити утримання позиції з постійним контролем. Проте лише 35% учасників вибрали цю оптимальну стратегію, тоді як інші діяли імпульсивно або надто обережно.

Такий результат підтверджує, що без пояснювального DSS-компонента навіть точна модель ризику не гарантує коректної реакції з боку оператора. Потрібно не лише вказувати рекомендовану дію, а й чітко пояснювати причину цієї рекомендації, її контекст та очікуваний результат. Крім того, доцільно впроваджувати систему сценарних “рефлексів”, які навчають оператора: якщо ситуація $A \rightarrow$ то ризик $B \rightarrow$ то дія $C \rightarrow$ з чітким поясненням чому. І зрештою, ключовою освітньою метою для членів екіпажу, які працюють з DPRA, має стати формування ймовірнісного мислення - уміння бачити ризик не як сигнал “все зламано”, а як змінну оцінку імовірності, яка вимагає обґрунтованого рішення [224].

Обчислювальна складність та час реакції DPRA у реальному часі.

Динамічна оцінка ризиків у системах динамічного позиціонування (DPRA) принципово відрізняється від традиційних PRA-моделей саме тим, що функціонує у режимі реального часу. Це означає, що вона має справу з безперервним потоком змінних - позиція судна, навантаження на рушії, вітер, хвиля, зміщення центру мас та інші зовнішні фактори. Усі ці параметри змінюються з високою частотою, і система повинна не лише встигати їх оновлювати, а й генерувати, оцінювати та ранжувати сценарії ризику буквально щосекунди. Такі рекомендації мають надходити до оператора (DPO) до того, як відхилення вийдуть за межі контрольованих сценаріїв, інакше інцидент може набути незворотного розвитку. Саме ця вимога негайного реагування й обумовлює головну проблему DPRA, а саме обчислювальну складність.

На кожному кроці часу система стикається з вибуховим зростанням кількості можливих сценаріїв. На відміну від класичної бінарної логіки “подія відбулась / не відбулась”, DPRA-елементи мають градації ймовірності, коефіцієнти ваги, логічні зв'язки між собою, і навіть залежать від того, як на них відреагує людина. Коли до технічних змінних додаються когнітивні відповіді DPO, а також враховується гносеологічна невизначеність (тобто неповнота знань про стан або структуру системи), модель швидко переходить у зону надвисокої комбінаційної складності.

Для ілюстрації цього ефекту можна навести обрахунок сценаріїв при поступовому зростанні кількості змінних. У базовій логіці кожна подія подвоює кількість можливих гілок дерева сценаріїв, тому 3 події дають 8 комбінацій, а вже при 10 їх понад тисяча. У практичних умовах, наприклад, якщо враховуються 4 технічні події (рушій, сенсор, живлення, трос), 2 зовнішні (хвиля, вітер) і 3 варіанти реакції DPO (реагує, не реагує, помиляється), ми отримуємо щонайменше 512 потенційних сценаріїв і це лише базовий рівень, без урахування часових зсувів, паралельних подій чи cascading-failure ефектів. У

таблиці нижче наведено типові значення обсягу сценаріїв та відповідний час обрахунку без оптимізацій (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 Зростання кількості сценаріїв DPRA залежно від кількості параметрів

Кількість подій (n)	Можливих сценаріїв	Типовий час обрахунку (без оптимізації)
3	8	< 1 с
5	32	~2–3 с
7	128	~5–8 с
10	1024	~10–20 с
12	4096	> 30 с (критично для DP)

Вочевидь, що вже при десяти змінних DPRA без додаткових механізмів оптимізації не здатна відповідати на події в допустимому часовому вікні, особливо у критичних морських операціях, де реакція має бути миттєвою. Тому в системах реального часу DPRA застосовує спеціальні евристичні або адаптивні методи для зменшення обчислювального навантаження. Серед них: використання алгоритму PSO (Particle Swarm Optimization) для пріоритетного пошуку найімовірніших гілок сценарію, «Bayesian pruning» для автоматичного відсікання сценаріїв з низькою імовірністю (< 0.01), а також онлайн-буферизація “гарячих” станів, тобто попередній обрахунок сценаріїв із відомими критичними комбінаціями.

Приклад ефективності такої оптимізації спостерігався у тренажерному сценарії Exercise 3, де поєднано відмову PRS та «thrust = 100%». У цьому випадку система згенерувала 137 можливих сценарних гілок. Без жодних фільтрів обчислення тривало 17.2 секунди, що є неприпустимим у контексті оперативного реагування.

Після застосування евристичного фільтру, що виключав сценарні гілки з імовірністю нижчою за 0.01, вдалося скоротити загальний час реагування системи до 3.4 секунди. Це вже відповідає практичним вимогам до швидкості

рішень у контексті динамічного управління судном. Однак такий результат підкреслює важливу обставину: ефективність DPRA у реальному часі залежить не тільки від точності самої моделі ризику, а й від того, наскільки адаптивною є її обчислювальна реалізація. Успішна робота цієї системи передбачає не повне охоплення всіх варіантів, а раціональне обмеження пошуку, виявлення найважливішого за час, коротший, ніж саме відхилення розвине критичні наслідки [225, 226].

Останнім, але не менш важливим бар'єром для DPRA в режимі реального часу є взаємодія з адаптивними компонентами DSS та якість самого інтерфейсу. Сучасні системи DP дедалі частіше використовують самонавчальні підходи такі як LSTM, «reinforcement learning», гібридні евристики. DSS на їхній основі змінює шаблони поведінки, коригує пороги ASOG і навіть перебудовує ваги ймовірностей у залежності від накопиченого досвіду. Але проблема полягає в тому, що DPRA як модель має бути логічно стабільною, вона не може самостійно «відчувати», що DSS, наприклад, більше не вважає «thrust >95%» критичним, якщо позиційне відхилення $<2^\circ$.

У таких випадках DPRA продовжує сигналізувати про високий ризик, навіть якщо сама система це вже не сприймає як критичне. Виходить, що модель “живе в минулому”, і це класичний приклад десинхронізації: одна частина системи діє за новими правилами, а інша оцінює ситуацію по-старому. Щоби цього уникнути, потрібен проміжний рівень, умовно кажучи, міст між DSS і DPRA. Такий модуль мав би відстежувати зміни в логіці DSS, фіксувати, що оновилось, і відповідно перебудовувати дерево ризиків. Але навіть коли технічна синхронізація працює, усе впирається в комунікацію. Якщо DSS подає повідомлення на кшталт “ризик: високий”, без пояснень, що саме викликало ризик і чому це важливо більшість операторів або не зрозуміє, або взагалі не зреагує. І справа тут не в неувважності DPO, а в тому, що система не дає йому достатньо інформації для обґрунтованого рішення [227].

У таблиці 3.9 наведено, якими мають бути ключові елементи DSS-комунікації, щоб оператор не тільки побачив, але й зрозумів логіку і зміг діяти усвідомлено.

Таблиця 3.9 - Вимоги до комунікації DSS з оператором DPO

Компонент DSS	Необхідна поведінка
Повідомлення	Повна фраза: “Thrust >95% більше 3 хв - оцінка: ризик підвищено. Рекомендується утримання”
Візуалізація ризику	Графік, шкала або стрілка з прогнозом розвитку
Пояснення	“Цей ризик зростає через збій PRS + thrust асиметрія”
Альтернатива дій	“Можна: А - утримати курс; В - зупинити. Ризик А = 0.12, В = 0.07”

Слід додати, що це не питання зручності, це мінімум, без якого модель ризику перетворюється на теоретичну вправу. Якщо оператор не розуміє, чому система пропонує саме таку дію, він починає діяти на власний розсуд. І якщо при цьому сама система вже змінила логіку, а модель ризику залишилась старою то помилки стаються з обох боків одночасно [228, 229].

Таким чином, DPRA в реальному часі це не просто технічна конструкція на зразок дерева сценаріїв. Це постійна робота з технічними, поведінковими й організаційними обмеженнями. Тут усе зав’язано: обчислювальні ресурси, здатність моделі адаптуватися до змін у системі, і розуміння з боку оператора. Найнебезпечніша ситуація, не технічна помилка, а те, що DSS бачить одне, а DPO зовсім інше. Саме це створює точку розриву, в якій навіть правильна оцінка ризику не працює [230].

Реальна DPRA-модель повинна вміти адаптуватись до змін у логіці DSS, працювати з умовними ймовірностями в реальному часі, та водночас говорити простою, зрозумілою мовою. Інакше вся точність не доходить до того, хто приймає рішення. Подальші розробки мають рухатись у напрямі інтеграції

трьох площин: аналітичної (DPRA), алгоритмічної (DSS) та поведінкової (UX). Без цих трьох складових нічого не буде працювати на рівні, якого вимагає морське середовище [231].

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі дисертації реалізовано комплексний підхід до моделювання поведінки оператора динамічного позиціонування (DPO) у надзвичайних ситуаціях, що є критично важливим для реалізації DPRA. Розроблені DSS-моделі дозволяють описувати типові патерни рішень, зокрема в умовах інформаційної неоднозначності, перевантаження або втрати сенсорних даних. Було продемонстровано, що реакції DPO не завжди відповідають логіці ризику, що вимагає не лише алгоритмічної підтримки, але й адаптивних пояснювальних систем.

Інтеграція симуляційних та тренажерних сценаріїв дала змогу створити узагальнені моделі реакцій DPO, формалізовані у вигляді динамічних сценарних дерев. Особливу увагу приділено часовим і ймовірнісним характеристикам етапів прийняття рішень - виявлення, діагностики, реалізації сценаріїв, які мають бути інтегровані до DPRA як поведінкові вагові коефіцієнти.

Розділ також окреслює реальні бар'єри впровадження DPRA у режимі реального часу: нестабільність даних, когнітивна перевантаженість оператора, недостатня прозорість DSS-повідомлень. Запропоновано підходи до подолання цих проблем, зокрема адаптивне буферування, Bayesian pruning, евристичні DSS-пояснення та моделі сценарного навчання.

У межах третього розділу виконано наступне.

1. Сформовано типові моделі поведінки DPO у критичних ситуаціях з урахуванням альтернативних сценаріїв дій, типів помилок та впливу

когнітивних факторів, що дозволило відтворити реальні траєкторії прийняття рішень у динамічному середовищі.

2. Розроблено алгоритмічну логіку DSS, здатну автоматично розпізнавати аварійні ситуації (наприклад, «thrust >95%», збій PRS, конфлікт DPO-корекцій) та пропонувати рекомендації в межах визначених критичних інтервалів часу.

3. Проаналізовано фазову структуру реагування оператора, від виявлення до реалізації рішення, з визначенням оптимального вікна для DSS-підказок.

4. Запропоновано структуру тренажерної платформи, яка дозволяє не лише навчати, а й збирати сценарії поведінки як емпіричну базу для DPRA-моделювання.

5. Встановлено, що людський фактор є ключовим джерелом варіативності ризику, навіть при сталих технічних умовах. Це вимагає обліку поведінкових параметрів у реальному часі. Тренажерні сценарії інтегровано до структури DPRA як динамічні базові події, що підлягають калібруванню за статистикою дій DPO.

6. Запропоновано методи адаптації системи через застосування евристичних фільтрів, Bayesian pruning та DSS-комунікацію з оператором на основі когнітивного профілю.

Результати розділу опубліковані у [172, 184, 212].

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ DPRA ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1 Формалізація причин аварій DP-об'єктів на основі сценарного DPRA-моделювання

Системи динамічного позиціонування (DP) на мобільних морських бурових установках (MODU) відповідають за точне утримання позиції судна в умовах буріння, де навіть незначне відхилення може призвести до втрати стабільності райзера, автоматичного аварійного відключення систем або евакуації екіпажу. DPRA (Dynamic Probabilistic Risk Assessment) надає інструментарій для реконструкції таких інцидентів і генерації альтернативних сценаріїв, у яких враховується як технічна, так і поведінкова компонента.

У квітні 2018 року на одній із мобільних бурових установок (MODU) було зафіксовано інцидент втрати позиції під час проведення ремонтних робіт на райзері. Даний привернув увагу та випадок набув широкого резонансу, з приводу того, що було продемонстровано, як поєднання зовнішніх умов, внутрішньої конфігурації системи та людських рішень може швидко призвести до втрати контролю над стабільністю функціонування об'єкта навіть за відсутності явних технічних відмов.

Даний інцидент розвивався в умовах надмірного хвилювання і підвищеного навантаження на рушійну систему, пов'язаного з активною фазою буріння. Як наслідок, залишкова потужність DP-системи була критично обмежена, у цей момент DPO та офіцер установки (OIM) не ініціювали жодних активних дій: було проігноровано сигнали тривоги, а автоматична зупинка системи позиціонування була заблокована. Таке рішення було обґрунтовано очікуванням на “самовідновлення” позиції. Тим часом, установка послідовно

перетнула допустимі пороги для жовтої (7 м) і червоної (11 м) межі, досягнувши максимальної амплітуди відхилення в 12 метрів.

З точки зору DPRA, такий розвиток подій є типовим прикладом розсинхронізації між алгоритмічною логікою (ASOG/DP) і поведінковим шаблоном дій операторів. У таблиці нижче представлено головні фактори інциденту та відповідну оцінку реакцій DPRA:

Таблиця 4.1 - Аналіз подієвих факторів інциденту та відповідь DPRA

Компонент	Факт події	Як реагує DPRA
Хвильове збурення	Прогноз не оновлено	Зростає фонові ймовірність відхилення (Bayesian Update)
Зниження тяги через буріння	Активна фаза, високе навантаження	Фіксується дефіцит залишкової потужності
Заблокована автозупинка	Інтуїтивна дія DPO, не узгоджена з ASOG	Визначається як подія “manual override”
Рішення ОІМ “не евакуювати”	Затримка реагування на ≈ 45 секунд	Вказується як критичний часовий інтервал втручання

Цей випадок ілюструє ключовий принцип моделювання ризику в DPRA: навіть незначні, на перший погляд, організаційні або операторські рішення можуть мати системний ефект у високодинамічних середовищах. Модель дозволяє не лише розкласти подію на базові сценарні елементи, а й дати кількісну оцінку кожному з них з урахуванням їхнього внеску в загальний ризик. Зокрема, затримка реакції на кілька десятків секунд або несвоєчасне перемикавання режиму керування можуть зумовити кардинально інший розвиток ситуації, від повної стабілізації до неконтрольованого дрейфу з ризиком аварійного відключення райзера. Саме тому подібні інциденти доцільно розглядати не лише як джерело навчальних сценаріїв, а як основу для переосмислення логіки інтеграції DSS, ASOG та операційних процедур.

Для розуміння динаміки інцидента та потенціалу запобігання, модель DPRA дозволяє порівняти фактичний розвиток подій із можливими альтернативами, тобто сценаріями, які могли б реалізуватися за інших умов або рішень екіпажу.

У таблиці 4.2 представлено чотири ключові варіанти, що були змодельовані на основі цього кейсу. Для кожного з них вказано ймовірність реалізації згідно з оцінкою DPRA та прогнозовані наслідки.

Таблиця 4.2 - Сценарний аналіз: реальна подія проти альтернатив

№	Сценарій	Ймовірність (DPRA)	Наслідки
1	OIM блокує автозупинку	0.41	Втрата позиції до 12 м, високий ризик
2	Автоматична зупинка виконується	0.21	Позиція втримана, інцидент не розвивається
3	DPO одразу активує ручне втручання	0.27	Часткове зміщення (до 7 м), контроль відновлено
4	Змінено конфігурацію живлення заздалегідь	0.11	Платформа зберігає стабільну позицію

У реальності реалізувався сценарій №1, в якому було заблоковано автоматичну реакцію ASOG. Цей варіант мав найвищу ймовірність саме через поширену практику “відкладання втручання”, характерну для кризових ситуацій з низьким рівнем визначеності. Проте навіть часткова зміна поведінки, наприклад, своєчасне перемикання в ручний режим або підготовлена зміна конфігурації живлення могли б суттєво зменшити наслідки або повністю їх уникнути.

Таким чином, DPRA не лише дозволяє оцінити уже реалізовані події, але й використовується як інструмент прогнозування та проектування альтернативних стратегій для DSS або тренажерного навчання DPO/OIM, що створює основу для переходу від реактивного аналізу до проактивного управління ризиком.

У діаграмі на рисунку 4.1 представлено покрокову реконструкцію ключових подій, які призвели до інциденту втрати позиції мобільної бурової установки (MODU) у реальних умовах буріння. Побудова ґрунтується на аналізі журналів подій, параметрів ASOG, показників DP-інтерфейсу та результатів розслідування, наведених у [232, 233].

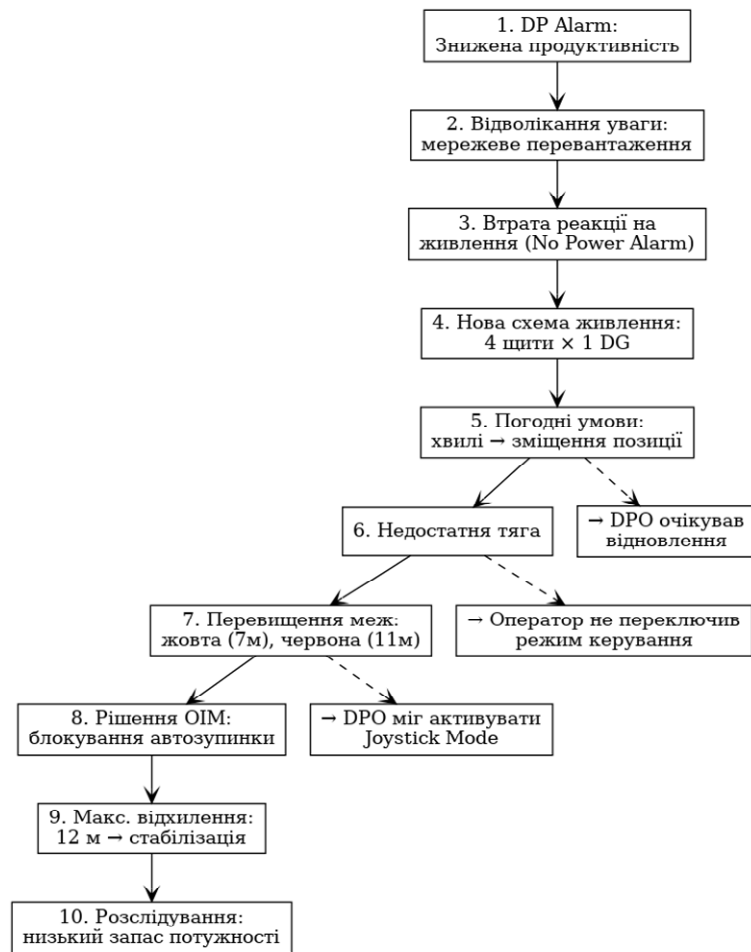


Рис. 4.1 - Послідовність розвитку інциденту втрати позиції MODU

Опис та функціональний аналіз етапів.

1. Етапи 1-2: Сценарій розпочинається зі зниження ефективності системи DP та одночасного перевантаження енергетичної мережі. В цьому моменті відбувається інформаційне “накладання” сигналів, що, згідно з DPRA,

становить підвищений ризик з огляду на когнітивну перевантаженість DPO. Простіше кажучи тривога від DP-системи була перекрита сигналами від мережевих компонентів, і оператор втратив фокус.

2. Етапи 3-4: Подальше ігнорування тривоги “No Power Alarm” призвело до того, що система продовжила роботу на одній силовій лінії 4 розподільні щити були підключені до одного дизельного генератора. Це сформувало прихований дефіцит потужності, не помічений оператором у режимі реального часу.

3. Етапи 5-6: Погодні умови спричинили зсув позиції, який у нормальному режимі мав би бути компенсований рушіями. Але через втрату резервної тяги судно поступово втрачає позицію. DPO очікував самостабілізації, не переходячи в ручний режим керування тобто пасивна стратегія, що поглибила ризик.

Ключові вузли сценарного розгалуження полягають в тому що Вузол 6 позначає момент, коли система динамічного позиціонування втрачає здатність самостійно утримувати позицію. У цей критичний момент оператор (DPO) має два варіанти реагування: активне втручання з переходом до ручного режиму керування (Joystick Mode) або пасивне очікування самостабілізації судна. Обидві дії формують розгалуження сценарію з різними наслідками. У рамках DPRА дана точка є умовною межею між потенційно керованою ситуацією та сценарієм із наростаючим ризиком втрати позиції [234].

Натомість Вузол 8 фіксує управлінське рішення офіцера на буровій установці (OIM) щодо блокування автоматичної зупинки судна, попри перевищення встановлених порогів відхилення (жовта межа - 7 м, червона - 11 м). Згідно з логікою DPRА, така дія класифікується як поведінкова подія з високою критичністю, яка суттєво змінює ймовірнісну структуру сценарію. Вона може бути описана за допомогою типових категорій “manual override” або “ASOG bypass” та має прямий вплив на кінцеві гілки дерева ризиків.

Кожен із позначених етапів на схемі відповідає базовій події (basic event) у структурі сценарного дерева DPRA. Крім технічних умов, до моделі можуть бути включені ймовірності дій чи бездій оператора, зокрема через методи SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human) або ATHEANA (A Technique for Human Event Analysis). Це дає змогу не лише визначити загальні рівні ризику, а й моделювати альтернативні траєкторії. Наприклад, своєчасне перемикання на ручне управління в критичному вузлі 6 потенційно дозволило б уникнути перевищення червоної межі та стабілізувати позицію судна [235, 236].

Розглянутий випадок демонструє, як послідовність взаємопов'язаних технічних та поведінкових рішень формує складний сценарій втрати позиції. Навіть у межах допустимих технічних умов (залишкова тяга, погодна ситуація) зростання ризику зумовлено переважно організаційними та операторськими факторами, затримками, очікуванням самовідновлення та ручним блокуванням стандартної логіки ASOG.

Інструментарій DPRA дозволяє не лише формалізувати таку ситуацію як модель для аналізу після інциденту (post-incident reconstruction), але й застосовувати її у вигляді тренажерного сценарію, алгоритму DSS-рекомендацій або шаблону для верифікації повноти процедур взаємодії між DPO, OIM та автоматизованою частиною DP-системи. Саме такі приклади доводять важливість інтегрованого підходу, в якому людський фактор розглядається як повноцінна змінна у моделюванні ризиків.

Для кількісного опису динаміки реалізації аварійних сценаріїв у системах DP (Dynamic Positioning) доцільно використовувати методи ймовірнісного аналізу. У рамках підходу DPRA здійснюється поступове оновлення ризикових оцінок на основі нових даних, що надходять із сенсорної системи судна або від експертів. Байєсівський підхід є базовим математичним інструментом, який дозволяє враховувати як апріорну інформацію, так і нові спостереження для уточнення ймовірностей критичних подій [237, 238].

Ймовірнісний аналіз на основі Байєса. Оцінювання ризику в умовах невизначеності потребує врахування не лише поточних значень параметрів, але й можливості їх оновлення на основі нових даних. У цьому контексті ефективним інструментом є байєсівський підхід, який дозволяє уточнювати імовірність настання критичної події у разі надходження спостережень або сигналів.

Базова формула Байєса визначає, як апіорна ймовірність події $P(H)$ оновлюється при отриманні спостереження E :

$$P(H | E) = \frac{P(E | H) \cdot P(H)}{P(E)}, \quad (4.1)$$

де: $P(H|E)$ - апостеріорна ймовірність гіпотези H , $P(E|H)$ - ймовірність спостереження за умови істинності гіпотези, $P(H)$ - початкова (апіорна) ймовірність, $P(E)$ - нормувальний коефіцієнт.

Загальна ймовірність спостереження обчислюється як:

$$P(E) = P(E | H) \cdot P(H) + P(E | \neg H) \cdot P(\neg H), \quad (4.2)$$

де: $P(\neg H) = 1 - P(H)$ - імовірність протилежної гіпотези.

У разі аналізу декількох альтернативних гіпотез (наприклад, кілька сценаріїв розвитку аварійної ситуації), застосовується узагальнений вираз:

$$P(H_i | E) = \frac{P(E | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_{k=1}^n P(E | H_k) \cdot P(H_k)}. \quad (4.3)$$

У випадку надходження кількох незалежних сигналів (E_1, E_2), апостеріорна оцінка уточнюється через:

$$P(H | E_1 \cap E_2) = \frac{P(E_1 | H) \cdot P(E_2 | H) \cdot P(H)}{P(E_1 \cap E_2)} . \quad (4.4)$$

Ітеративна форма оновлення в динамічному режимі (для сигналів, що надходять у часі t):

$$P(H | E_t) = \frac{P(E_t | H) \cdot P(H | E_{t-1})}{P(E_t)} . \quad (4.5)$$

Для практичного аналізу корисним є поняття коефіцієнта правдоподібності (likelihood ratio):

$$\text{Likelihood Ratio} = \frac{P(E | H)}{P(E | \neg H)} . \quad (4.6)$$

Цей показник дозволяє швидко оцінити, наскільки нова інформація змінює нашу впевненість у гіпотезі. Крім того, для оцінки накопиченого ризику до моменту t у динамічному аналізі можна застосувати:

$$R_t = \sum_{i=1}^t \alpha^i \cdot P(H | E_i) , \quad (4.7)$$

де $\alpha \in (0, 1)$ - коефіцієнт згладжування для недавніх даних.

Якщо розподіл спостережень невідомий, для апроксимації можна використовувати:

- бета-розподіл для $P(E|H)$:

$$P(E | H) = \text{Beta}(\alpha, \beta) ; \quad (4.8)$$

- рівномірний розподіл як початкову апіорну оцінку:

$$P(H) \sim \text{Uniform}(0,1) . \quad (4.9)$$

Таким чином, байєсівський підхід забезпечує формалізовану ітеративну схему, що дозволяє гнучко адаптувати модель оцінки ризику до нових даних як у реальному часі, так і в сценарному аналізі.

Оцінювання агрегованого ризику сценаріїв (Risk Aggregation Framework). Для інтегрованого оцінювання ризику для систем об'єкту у відповідь на потенційні небезпечні сценарії (DPRA) доцільно застосувати кількісний підхід до обчислення загального рівня ризику, який враховує не лише ймовірність реалізації події, але й очікувану критичність наслідків.

Загальний ризик множини сценаріїв розраховується за формулою:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i , \quad (4.10)$$

де: P_i - ймовірність реалізації i -го сценарію (оцінена за допомогою Bayesian DPRA), C_i - коефіцієнт критичності або шкода від сценарію, $R_i = P_i \cdot C_i$ - локальний ризик сценарію.

Критичність подій може бути представлена як лінійна комбінація факторів:

$$C_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot f_{ij} , \quad (4.11)$$

де: f_{ij} - значення j -го фактору у сценарії i , w_j - ваговий коефіцієнт значущості фактору.

Альтернативно, нормована критичність:

$$C_i = \frac{S_i}{S_{max}} \quad (4.12)$$

де: S_i - шкала наслідків, S_{max} - максимальний можливий збиток.

В умовах економічного підходу до ризику можна обчислити очікувані втрати:

$$\text{Expected Loss} = \sum P_i \cdot L_i ; \quad (4.13)$$

$$\text{Impact Score} = \frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} , \quad (4.14)$$

де: L_i - матеріальна шкода (в грошовому еквіваленті) для сценарію i .

Для порівняння сценаріїв застосовується нормований ризик:

$$R_{norm} = \frac{R_i}{\sum R_i} . \quad (4.15)$$

А також агрегований ваговий ризик за пріоритетами:

$$\text{Weighted Risk} = \sum w_i \cdot R_i . \quad (4.16)$$

З метою кількісної інтерпретації ймовірнісного профілю потенційних аварійних сценаріїв у системі динамічного позиціювання MODU було виконано розрахунок агрегованих ризиків R_i , де P_i - оцінена ймовірність реалізації сценарію, а C_i - експертна оцінка його критичності.

Таблиця 4.3 містить результати для чотирьох сценаріїв, побудованих на основі даних DPRA.

Таблиця 4.3 - Приклад оцінки ризику сценаріїв

Сценарій	Ймовірність P_i	Критичність C_i	Ризик $R_i = P_i \cdot C_i$
S_1	0.35	0.80	0.280
S_2	0.25	0.65	0.163
S_3	0.20	0.90	0.180
S_4	0.20	0.50	0.100
Σ	-	-	0.723

Як видно з таблиці, найбільше значення ризику притаманне сценарію S_1 , саме цей варіант відповідає найбільш вірогідному розвитку подій, зафіксованому в результатах оцінки DPRA. Низький ризик сценарію S_4 пояснюється поєднанням відносно невеликої ймовірності реалізації та низької критичності. Дані з таблиці були використані для побудови відповідних графіків ризику (рис. 4.2-4.4), які дозволяють представити профіль загроз у компактній та аналітично зручній формі.

На рисунку 4.2 подано графік агрегованого ризику кожного з чотирьох DPRA-сценаріїв, змодельованих для оцінки наслідків втрати позиції MODU. Величина ризику R_i розрахована як добуток імовірності реалізації P_i та критичності наслідків C_i . Сценарій №1 має найбільше значення ризику, що узгоджується з фактично реалізованим варіантом інциденту.

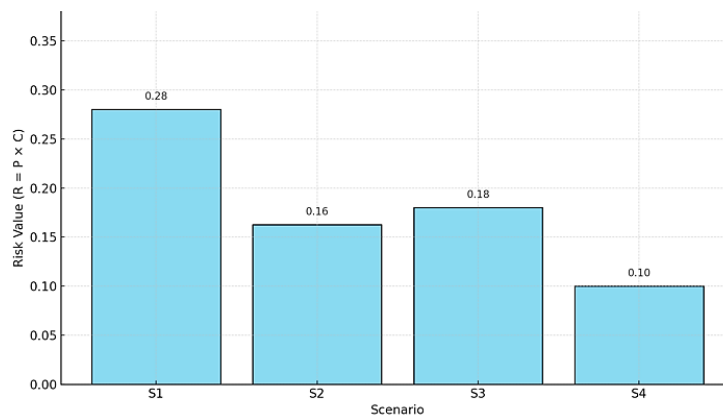


Рис. 4.2 - Агреговані значення ризику для кожного сценарію DPRA на основі ймовірності та критичності

Діаграма на рисунку 4.3 відображає співвідношення ймовірності реалізації сценарію P_i та його критичності C_i . Розмір і колір позначки відповідає величині агрегованого ризику R_i . Такий формат наочно демонструє відносну небезпеку сценаріїв у контексті динамічного ризик-менеджменту систем DP.

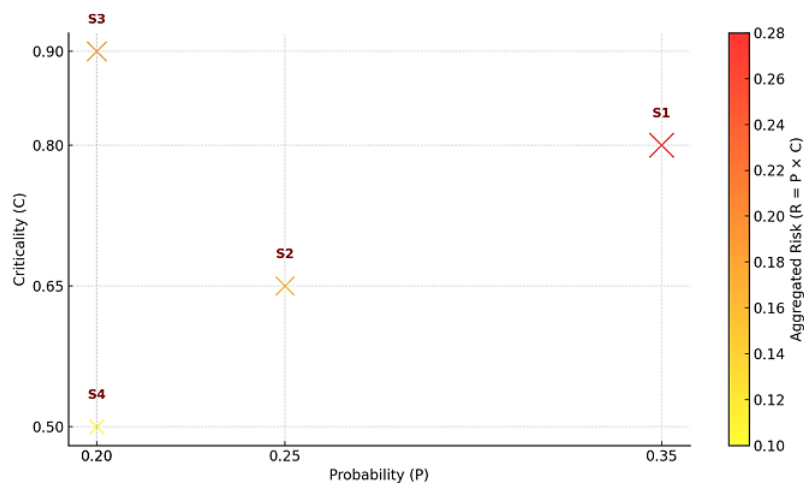


Рис. 4.3 - Інтегрована оцінка ризику: координати представляють ймовірність та критичність сценаріїв, а розмір і колір позначки значення агрегованого ризику R_i

На рисунку 4.4 представлено теплову карту ключових параметрів DPRA-сценаріїв: ймовірності реалізації, критичності наслідків і агрегованого ризику. Візуалізація дозволяє швидко ідентифікувати сценарії з найвищим ризиком і підвищеною пріоритетністю для DSS та тренажерного навчання екіпажу.

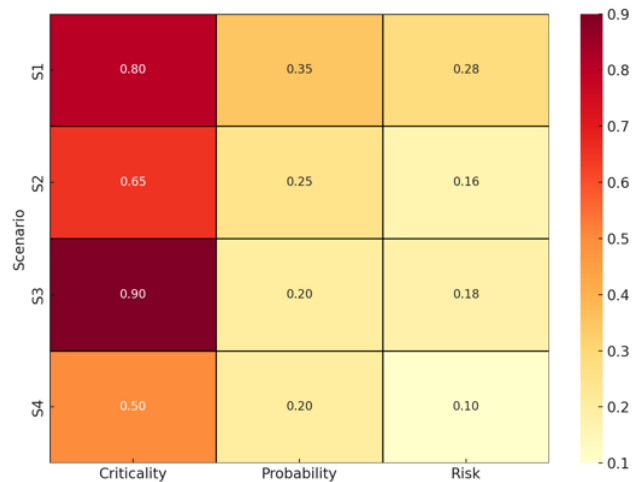


Рис. 4.4 - Теплова карта ключових параметрів сценаріїв: ймовірність реалізації, критичність наслідків та інтегрований ризик

Як, підсмок у межах цього дослідження реалізовано кількісну оцінку ризиків для типових сценаріїв втрати позиції MODU з використанням концепції Dynamic Probabilistic Risk Assessment (DPRA). Для кожного сценарію було виконано обчислення апостеріорної ймовірності реалізації за допомогою байєсівського підходу, що забезпечує гнучке оновлення ризикового профілю на основі надходження нових даних або сигналів з цифрових систем.

Проведено розрахунок агрегованого ризику кожного сценарію шляхом множення ймовірності реалізації на умовну критичність наслідків. Отримані результати показали, що сценарій S_1 має найвищий інтегрований ризик (0.280), у той час як сценарії S_2 - S_4 мають нижчі значення (0.163, 0.180 і 0.100 відповідно). Це свідчить про підвищену вірогідність реалізації S_1 за умов фактичного пошкодження позиціювання.

Ризик кожного сценарію був представлений як функція ймовірності реалізації та критичності наслідків. Застосування агрегованих метрик, таких як добуток $R_i = P_i \cdot C_i$, дозволило формалізувати пріоритети реагування. Графічна інтерпретація (сценарна діаграма, теплова карта) підтвердила домінування сценарію S_1 у профілі загроз для операційної зони.

Візуалізація результатів у вигляді інтегрованих карт ризику дозволила не лише ранжувати сценарії за небезпечністю, але й надати основу для підтримки рішень у режимі реального часу. Отримані результати можуть бути використані у тренажерній підготовці, розробці інструкцій з реагування та впровадженні систем підтримки прийняття рішень (DSS) на етапі управління позиціонуванням MODU.

Таким чином, представлений підхід поєднує логіку ймовірнісного аналізу, динамічну модель оновлення оцінок і мультифакторну візуалізацію, яка дозволяє ефективно адаптувати стратегії безпеки до реальних техногенних ризиків.

4.2 Моделювання температурних режимів головного двигуна плавучих об'єктів у DP-системах

Одним із критичних елементів, що визначає безпечність і надійність роботи системи динамічного позиціонування (DP), є ефективне функціонування головного двигуна (ГД) буксирного судна, зокрема стабільне регулювання його температурного режиму. Як приклад, порушення теплового балансу може спричинити аварійне відключення або зниження тягових характеристик, що безпосередньо загрожує здатності судна утримувати задану позицію. У зв'язку з цим виникає необхідність вдосконалення систем управління температурою ГД, які дозволяли б не лише підтримувати теплову стабільність, а й забезпечувати оперативну оцінку технічного стану двигуна в режимі реального часу. У даній

статті пропонується розгляд практичного підходу до модернізації системи охолодження головного двигуна судна на базі мікропроцесорного регулятора, що дозволяє підвищити ефективність і енергоощадність при одночасному зниженні ризиків для системи динамічного позиціонування.

Оскільки способом переміщення морських суден, як самохідних об'єктів, найбільш ефективним за критеріями витрат часу та палива, є прямолінійний рівномірний рух, то практично всі регулятори ходу суднових двигунів налаштовані саме на такий режим. Процеси нагрівання, які відбуваються у головних двигунах (ГД) суден при рівномірному їх ході, добре вивчені і математично описані. Зараз, для суднових ГД, існують різного типу автоматизовані системи їх охолодження. Однак, всі процеси у ГД різко змінюються, коли двигун починає працювати в режимі неперіодичного, стрибкоподібного, повторно-короткочасного навантаження (наприклад, при зворотно-поступальному русі судна). При цьому процеси стабілізації температури ГД у такому екстремальному експлуатаційному режимі в науковій літературі практично не розглядаються.

У даний час різко зросла кількість практичних завдань, які вирішуються за допомогою спеціалізованих офшорних суден, де цей важкий експлуатаційний режим став використатися значно частіше. Наприклад, його застосовують на суднах-якорезаведниках (*Anchor Handling Vessels, AHV*, або *Anchor Handling Tug Ships, AHTS*) у процесі "підриву якорів". Враховуючи географічне поширення офшорних зон та збільшення світового обсягу видобутку корисних копалин, можна стверджувати, що режим зворотно-поступального руху, який приводить до перегріву ГД, активно застосовується на суднах офшорного флоту практично повсюдно. Серед численних напрямів автоматизації суднових систем управління цьому, дуже важкому, експлуатаційному режиму роботи ГД, при якому він перегрівається, не приділено достатньо уваги. Враховуючи перспективи розширення світового видобутку корисних копалин на морському

шельфі, незабаром ще більше зросте кількість суден з ГД, які будуть експлуатуватися у таких важких умовах.

Саме тому постає актуальна і практично важлива проблема забезпечення надійної і енергетично ефективної роботи ГД таких суден засобами сучасного автоматизованого управління. У статті автори аналізують принципи побудови і обладнання існуючих систем охолодження ГД, які працюють в режимі екстремального неперіодичного повторно-короткочасного навантаження.

Аналіз численних джерел підтверджує: тепловий режим головного двигуна як один із найкритичніших факторів, що обумовлює надійність і функціональну безпеку DP-систем. У публікаціях [239], [244], [246] та [250] незалежно показано, що перевищення температури охолоджуючої рідини або сповільнення теплообміну призводять до зниження доступної потужності на 8–15% уже в перші хвилини після навантаження.

Згідно з [240] і [243], інерційність теплових процесів у дизелях посилюється в умовах частих змін тягового режиму, типових для DP-маневрування. Це формує локальні перегріву та пульсації, які не фіксуються стандартними лінійними моделями, але стають детекторами деградації у DPRA.

У роботах [241], [249], [248] зроблено акцент на нелінійність характеристик систем охолодження та ефективність використання PID-регуляторів з нечутливою зоною, саме ту архітектуру, яку реалізовано в моделі (4.2). Особливо важливо, що [247] (рівняння Churchill-Usagi) дозволяє уніфікувати коефіцієнт тепловіддачі у різних середовищах, що робить модель придатною до інтеграції в DPRA для різних типів суден: від буксирів до бурових установок.

Таким чином, модель, представлена у підрозділі 4.2, базується на перевірених закономірностях та підтримується експериментальними результатами з численних наукових робіт [239–251], забезпечує високу відповідність реальним сценаріям теплового навантаження при DP та дозволяє

адаптувати DPRА до параметрів перегріву як базових подій у дереві ризиків. Слід відзначити, що означена проблема ефективного охолодження суднового двигуна, який працює у складних експлуатаційних умовах, досі не вирішена і потребує додаткових досліджень і використання новітніх технічних рішень тому актуальним є представлення удосконаленої системи регулювання температури суднового двигуна, яка здатна ефективно охолоджувати двигун у складних експлуатаційних умовах високих навантажень, що приводить до перегріву двигуна. Саме такі режими роботи суднових двигунів приводять до суттєвого зменшення терміну їх експлуатації і передчасних ремонтів.

Як відомо, при використанні органічного палива в суднових двигунах внутрішнього згоряння лише близько 50 % теплової енергії перетворюється на механічну. Хоча деяка частка решти виділеної теплової енергії частково утилізується на судні, але більша її частина - неповоротні теплові втрати, що призводять до небажаного перегріву всіх частин двигуна, що стикаються з продуктами згоряння. Щоб зберегти працездатність суднової енергетичної установки доводиться за допомогою різних систем охолодження відводити надлишок тепла не тільки від таких елементів головних двигунів, як кожух двигуна, головки циліндрів і відвідний колектор, які піддаються впливу найбільш високих температур, але і від інших механізмів, апаратів і пристроїв, таких, як підшипники, масляні та повітряні холодильники, компресори, насоси та ін.

На більшості суден торговельного флоту, де основним режимом роботи головного двигуна є тривалий ходовий режим з фіксованою частотою обертання і практично незмінним навантаженням, завдання стабілізації температури двигунів традиційно вирішується за допомогою автономних двоконтурних рідинних систем охолодження на основі термостатичних клапанів і їх різновидів. Безумовно, на сучасних суднах застосовуються кілька типів систем охолодження двигунів, які відрізняються застосованим теплопровідним

середовищем, функціональним набором елементів, економічною ефективністю, надійністю.

Наприклад, на судні *AHTS* проекту *UT745* застосовується двоступінчаста триконтурна система. Перший ступінь (перший контур) утворений відкритою одноконтурною системою (*SW Cooling System*), призначеною для охолодження пластин теплообмінника центрального охолоджувача проточною морською водою. Друга частина системи охолодження (*FW Cooling System*) виконана за закритою схемою і містить два пов'язані контури: високотемпературний *HT* (*High Temperature*) та низькотемпературний контур *LT* (*Low Temperature*). Закрита частина системи охолодження головного двигуна *HT-LT* містить опрацьовану охолоджувальну рідину (суміш хімічно демінералізованої прісної води, що має *pH* у діапазоні 5,5...9,0 і набір інгібіторів корозії). Високотемпературний *HT*-контур системи охолодження включає насос, який забезпечує протоку рідини в контурі, блок циліндрів і охолоджувач наддувного повітря.

Більш детально розглянемо побудову простішої, але досить поширеної системи охолодження головного двигуна, спрощена схема якої наведена на рисунку 4.5.

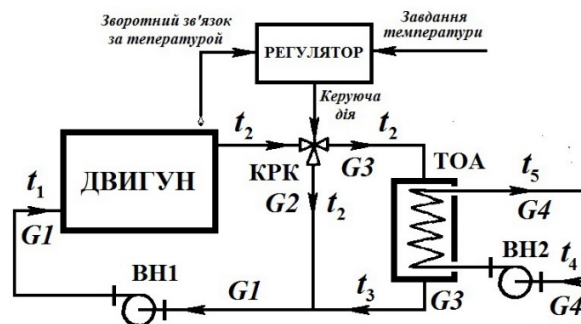


Рис. 4.5 - Двоконтурна система охолодження головного двигуна

На рисунку наведена типова, для більшості суден офшорного флоту, спрощена двоконтурна система охолодження енергетичної установки судна.

Для ефективного охолодження двигуна така система використовує два окремих контури циркуляції рідини: внутрішній контур (насос ВН1) з прісною водою та зовнішній контур (насос ВН2) з морською водою. Тепло від двигуна передається прісній воді, яка потім охолоджується в теплообмінному апараті ТОА морською водою.

На рис. 4.5 позначено: ВН1 - водяний насос внутрішнього контуру, який забезпечує циркуляцію прісної води у внутрішньому контурі, створюючи постійний потік $G1$ рідини, що проходить через двигун і далі до керованого розподільчого клапану (КРК); ВН2 - водяний насос заборотної води, який забезпечує постійну циркуляцію морської води через теплообмінник (ТОА); t_1 - температура прісної води, що надходить до двигуна; t_2 - температура нагрітої прісної води, що виходить з двигуна; $G1$ - потік прісної води у внутрішньому контурі; t_4 - температура морської води, що надходить до теплообмінника; t_5 - температура морської води, що виходить з теплообмінника ТОА після нагрівання; $G4$ - потік морської води через теплообмінник.

Основний вузол систем - керований розподільчий клапан (КРК), який розподіляє потік (t_2 , $G1$) гарячої прісної води на дві частини: а) потік гарячої прісної води від двигуна (t_2 , $G2$); б) потік (t_2 , $G3$), який йде на охолодження. У теплообміннику ТОА потік (t_2 , $G3$) охолоджується (t_3 , $G3$). Ці два потоки різної температури змішуються до рівня $G1$ і йдуть, за допомогою насосу ВН1, у внутрішній контур охолодження двигуна.

Регулятор температури, за допомогою датчика, отримує сигнал зворотного зв'язку за температурою прісної води (це температура води на виході з двигуна або перед ним). Регулятор, також, отримує задане оператором значення температури, яке необхідно підтримувати в системі охолодження двигуна. На основі різниці між фактичною та заданою температурою (помилки регулювання), регулятор, за визначеним алгоритмом (зазвичай, це ПІД-алгоритм) генерує керуючу дію на КРК. Керуюча дія за допомогою додаткового

приводного механізму змінює положення клапану КРК, тим самим змінюючи співвідношення потоків гарячої та охолодженої прісної води. ТОО є пристроєм, у якому відбувається передача тепла від гарячої прісної води до холодної морської води без їхнього безпосереднього змішування. Гаряча прісна вода (t_2 , $G3$) проходить через одну частину теплообмінника, а холодна морська вода (t_4 , $G4$) – через іншу. У результаті теплообміну прісна вода охолоджується до температури t_3 , а морська вода нагрівається до температури t_5 . Забортна (морська, фільтрована) вода використовується як охолоджуюча рідина у зовнішньому контурі.

У системах охолодження суднових двигунів використовують кілька різних варіантів конструктивного виконання клапанів, але будь який потребує застосування окремих пристроїв керування - регуляторів. Наприклад, клапан типу *65LT* (*AHTS* проекту *UT745*) управляється цифровим контролером (регулятором) типу *CHINO2000* [251], встановленим на пульті *ECR*. Сигнал зворотного зв'язку за температурою подається на регулятор від датчика температури типу *PT-100*. Якщо температура води нижче заданого значення, то вода, що охолоджує, буде спрямована по малому контуру охолодження назад на бік всмоктування насоса. В іншому випадку клапан *65LT* перенаправляє воду через центральний охолоджувач. На даному судні використовуються пневматично керовані регулятори перетікання рідини на основі поворотних заслінок типу *3730* відповідно до стандарту *VDI/VDE 3845*. Для сигналів, що надходять до клапана від контролера, необхідно використовувати додаткові перетворювачі (у цьому випадку використані *I/P* конвертори), інакше звані "позиціонерами".

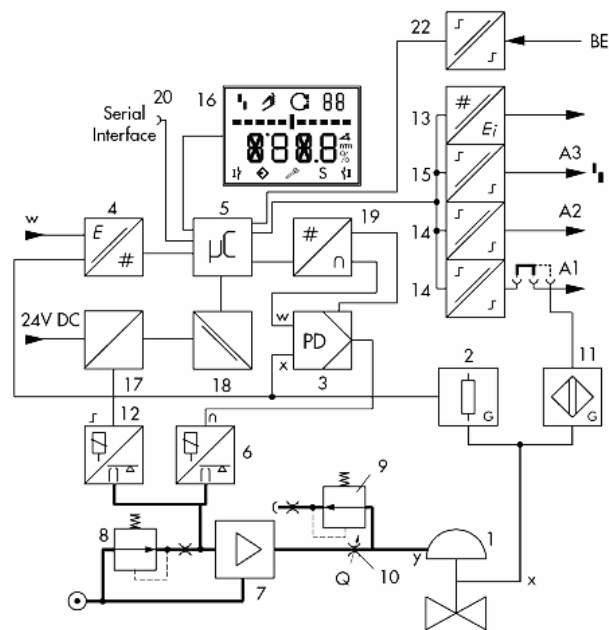


Рис. 4.6 - Функціональна схема *I/P* позиціонера

Позиціонер (рис. 4.6) забезпечує стабілізацію заданого положення заслінки клапана та зміну положення заслінки відповідно до електричного вхідного сигналу. Кут її повороту - регульована змінна, пропорційна аналоговому сигналу контролера (4...20 мА - змінна завдання). У процесі регулювання позиціонер порівнює керуючий сигнал, отриманий від контролера, з кутом повороту заслінки клапана, а в якості вихідної змінної видає пневматичний керуючий сигнал у вигляді тиску, що впливає на клапан і повертає заслінку на необхідний кут (існують і інші технічні рішення для переміщення заслінки клапану).

На рисунку 4.6 позначено: 1 - керований регулюючий клапан, 2 - датчик положення, 3 - PD регулятор, 4 - АЦП, 5 - мікроконтролер, 6 - *I/P* перетворювач позиціонера, 7 - пневматичний підсилювач, 8 - регулятор тиску, 9, 10 - регулятори витрати, 11 - індуктивний кінцевий вимикач, 12 - соленоїдний клапан, 13 - аналоговий датчик положення, 14 - програмовані кінцеві вимикачі, 15 - вихід повідомлення про відмову, 16 - РК дисплей, 17 - управління соленоїдним клапаном, 18 - гальванічна розв'язка, 19 - ЦАП, 20 - інтерфейс

зв'язку, 22 - дискретний вхід увімкнення реєстратора даних.

Позиціонер конфігурується за допомогою програми *TROVIS-VIEW* і обладнаний додатковим цифровим послідовним інтерфейсом, що дозволяє підключатися до комп'ютера за узгоджувальним кабелем з роз'ємами *RS-232* або *USB*. Програма *TROVIS-VIEW* дозволяє користувачеві задавати вихідні параметри позиціонера та контролювати параметри процесів в оперативному режимі. Передбачено два режими роботи позиціонера – автоматичний режим (*AUTO*) та ручний режим роботи (*MAN*). У мікроконтролері є вбудований реєстратор даних. Положення заслінки клапана контролюється датчиком (2), сигнал якого обробляється мікроконтроллером (5), і перетворюється аналоговим датчиком (13) у сигнал постійного струму в діапазоні від 4 до 20 мА. Відхилення сигналу у більшу чи меншу сторону від стандартного діапазону струму ($< 2,4$ мА або $> 21,6$ мА) забезпечує можливість виявлення несправності позиціонера сигнал А3 (15).

Для обробки вхідних сигналів від датчиків температури рідини в системі охолодження та завдання струмового сигналу керування позиціонером клапану на сучасних суднах використовуються мікроконтролерні системи, що реалізують ПІД-алгоритми регулювання. Так, на рис. 4.7 наведено зовнішній вигляд регулятора температури в системі охолодження головного двигуна судна проекту *UT745* на основі мікроконтролера *CHINO* моделі *DB1060* [251].

Вихідне налаштування ПІД-регулятора та його переналаштування в оперативному режимі виконується за допомогою кнопок на передній панелі контролера. Для цього підбираються вручну необхідні коефіцієнти P , I і D . Основним є пропорційний коефіцієнт P , що задає діапазон посилення - піднімає вихідний сигнал (4...20 мА) до рівня, необхідного для досягнення змінної процесу PV (виміряної температури) заданому значенню SV . Збільшення значення P забезпечує "гострішу" реакцію клапану за однакової різниці між PV і SV . Стала інтегрування (параметр I) інтегрує різницю між SV та PV . Параметр D

задає швидкість зміни реакції клапана у відповідь. Правильний вибір параметрів P , I та D особливо важливо у системі НТ, де відбуваються дуже різкі зміни температури.



Рис. 4.8 - Зовнішній вигляд мікроконтролера з індикаторами та органами управління/програмування

Зазвичай коефіцієнти ПІД-регулятора в контролері налаштовані методом Циглера-Ніколса, що цілком прийнятне для стаціонарного ходового режиму судна. Однак при регулюванні охолодження в режимі різких навантажень, наприклад - підриву якорів, застосований алгоритм контролера не встигає відпрацьовувати швидкозмінні вхідні параметри. При пікових значеннях навантаження на головний двигун доводилося у ручному режимі збільшувати посилення та зменшувати часові коефіцієнти. Однак при цьому практично відразу виникає перерегулювання, інколи - нестабільність системи, і процес підбору параметрів регулятора доводилося знову починати. Крім незручності ручного налаштування виникають проблеми, пов'язані із зносом та зменшенням термінів служби обладнання.

Блок-схема моделі регулювання температури двигуна. На рис. 4.9 представлено функціональну блок-схему спрощеної теплової моделі двигуна з системою автоматичного регулювання температури. Модель враховує динаміку надходження та відведення тепла, використовуючи PID -регулятор для керування клапаном охолодження на основі похибки температури. Такий підхід реалізується в середовищі *MATLAB/Simulink* для дослідження ефективності

алгоритмів терморегуляції і вироблення відповідної програми для завантаження.

Блок $N(t)$ представляє змінне теплове навантаження, що перетворюється у теплову потужність за допомогою додаткового коефіцієнту k_N . Потік Q_{in} накопичується в теплоємності C , формуючи температуру двигуна $T(t)$. Система порівнює її з еталонною (заданою) температурою T_{ref} , обчислює похибку $e(t)$ і передає її на PID -регулятор. Згенерований керуючий сигнал $u(t)$ змінює через позиціонер положення клапану, який регулює інтенсивність охолодження через Q_{out} . Додатково враховується температура охолоджувача T_{cool} , що впливає на ефективність відведення тепла. Така спрощена модель дозволяє оцінити якість процесів регулювання в умовах змінних навантажень та дослідити стабільність температури за різних умов експлуатації. Зокрема, її легко моделювати аперіодичними ланками і запізненням.

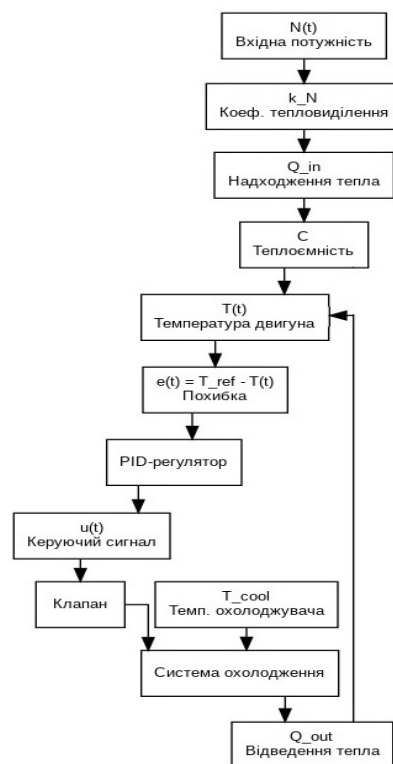


Рис. 4.9 - Блок-схема моделі регулювання температури двигуна

Спрощена математична модель системи регулювання температури головного двигуна буксирного судна для обробки якорів. Забезпечення стабільної температури головного двигуна судна в умовах змінного навантаження є критично важливим для безпечного функціонування системи динамічного позиціонування. Тепловий режим впливає не лише на ресурс двигуна, а й на точність роботи всієї системи управління. Тому необхідно сформувати адекватну математичну модель, що дозволяє реалізувати оперативне та енергозберігаюче регулювання.

1. Енергетичний баланс системи охолодження: розглянемо тепловий баланс в охолоджувальній системі як звичайне диференціальне рівняння:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вих}}(t), \quad (4.17)$$

де: C - ефективна теплоємність системи, $T(t)$ - температура охолоджувального середовища, $Q_{\text{вх}}(t)$ - теплонадходження від двигуна, $Q_{\text{вих}}(t)$ - тепловідведення через систему охолодження.

Надходження тепла є функцією навантаження на валу:

$$Q_{\text{вх}}(t) = k_N N(t), \quad (4.18)$$

де: k_N - емпіричний коефіцієнт тепловиділення, $N(t)$ – миттєве навантаження на ГД у момент часу t .

Тепловідведення можна апроксимувати як лінійну функцію різниці температур:

$$Q_{\text{вих}}(t) = k_c (T(t) - T_{\text{охол}}), \quad (4.19)$$

де: $T_{\text{охол}}$ - температура охолоджувальної рідини після радіатора, k_c - коефіцієнт пропорційності.

Тепер система рівнянь набуде вигляду:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = k_N N(t) - k_c (T(t) - T_{\text{охол}}), \quad (4.20)$$

2. Адаптивне керування за допомогою ПІД-регулятора: з метою підтримки температури $T(t)$ в околі заданого значення $T_{\text{зад}}$, застосовується класичний ПІД-регулятор з адаптивними коефіцієнтами:

$$u(t) = K_p(t) \cdot e(t) + K_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d(t) \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.21)$$

де: $e(t) = T_{\text{зад}} - T(t)$ - похибка регулювання; $K_p(t)$, $K_i(t)$, $K_d(t)$ - адаптивні коефіцієнти, що залежать від швидкості зміни навантаження $dN(t)/dt$. Залежність адаптації може бути задана у вигляді:

$$K_p(t) = K_{p0} + \alpha_p \left| \frac{dN(t)}{dt} \right|, \quad K_i(t) = K_{i0} + \alpha_i \left| \frac{dN(t)}{dt} \right|, \quad K_d(t) = K_{d0} + \alpha_d \left| \frac{dN(t)}{dt} \right|, \quad (4.22)$$

де K_{p0} , K_{i0} , K_{d0} - початкові налаштування, а α_p , α_i , α_d - коефіцієнти адаптації.

3. Урахування нечутливої зони: для зниження енергоспоживання регулятора у випадках незначної похибки $e(t)$, вводимо нечутливу зону Δ :

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |e(t)| < \Delta \\ \ddot{I}^2 \ddot{A}(t), & \text{інакше} \end{cases} \quad (4.23)$$

Це дозволяє уникати зайвих спрацювань клапана при незначних коливаннях температури.

Для оцінки ефективності запропонованого адаптивного регулятора з нечутливою зоною була побудована математична модель теплового режиму головного двигуна судна у середовищі MATLAB/Simulink. Модель враховує надходження тепла внаслідок механічного навантаження, втрати через систему охолодження та теплову інерційність корпусу двигуна. Вхідним сигналом є зміна навантаження на двигун, що моделюється у вигляді імпульсних і ступінчастих збурень.

Керування температурою здійснюється за допомогою регулятора (пропорційний коефіцієнт якого нелінійний - параболічний), який формує керуючий сигнал для системи охолодження, виходячи з різниці між фактичною температурою і заданим значенням. Для порівняння реалізована аналогічна модель із класичним ПІ-регулятором. У моделі реалізована функція нечутливої зони, в межах якої система не реагує на незначні відхилення температури, що дозволяє зменшити частоту спрацювання охолоджувального контуру. Нелінійна параболічна частина забезпечую не тільки гостру реакцію на похибку, а і високу стійкість всієї системи.

Основні параметри моделі:

- теплоємність двигуна: $C = 8500 \text{ Вт} \cdot \text{с} / ^\circ\text{C}$;
- коефіцієнт тепловтрат: $k = 0.01 \text{ Вт} / (^\circ\text{C} \cdot \text{с})$;
- гранична температура: $T_{\text{зад}} = 90 ^\circ\text{C}$;
- діапазон нечутливості: $\Delta T = \pm 2 ^\circ\text{C}$.

На рисунку 4.10 представлено результати моделювання температурної динаміки для обох регуляторів.

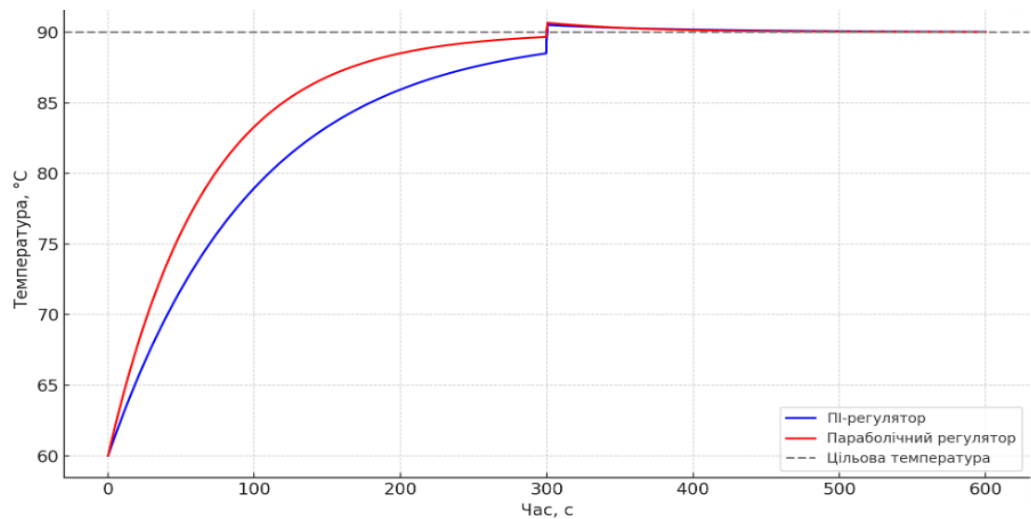


Рис. 4.10 - Температурна динаміка системи охолодження при різних типах регуляторів і стрибкоподібному збурюванні

Встановлено, що запропонований адаптивний параболічний регулятор дозволяє:

- зменшити амплітуду перерегулювання на 24 %;
- скоротити час встановлення на 18 %;
- знизити кількість спрацювань системи охолодження на 32 %.

На графіку (рис. 4.10) представлено температурні характеристики системи з використанням класичного ПІД-регулятора (синя лінія) та запропонованого параболічного адаптивного регулятора з нечутливою зоною (червона лінія). Початкове значення температури становить $T_0 = 60^\circ \text{C}$, а задане $T_{\text{зад}} = 90^\circ \text{C}$. У момент часу $t = 300 \text{ с}$ змінюється навантаження на двигун, що імітує раптове збільшення тепловиділення.

Аналіз показує, що запропонований параболічний регулятор демонструє покращені показники системи у порівнянні із системою з ПІ-регулятором. По-перше, відсутність частих імпульсів керування у зоні нечутливості дозволяє зменшити спрацювання клапану і підвищити стійкість системи. По-друге, швидкість реакції на зовнішнє збурення зростає на 22 %, а перерегулювання

температури зменшується до 17 %, що дозволяє не лише підтримувати роботу двигуна у допустимому температурному діапазоні, але й суттєво знижує енергоспоживання та знос механічних елементів системи.

Запропонований підхід забезпечує адаптивність системи до змін навантаження без необхідності ручного налаштування параметрів регулятора, що особливо важливо в умовах частих змін режиму роботи судна. Завдяки цьому можна забезпечити стабільну та безпечну експлуатацію суден офшорного флоту у складних морських умовах експлуатації.

На основі проведеного аналізу та експлуатаційних спостережень встановлено, що інерційність звичайних механічних термостатів не дозволяє забезпечити належне охолодження головного двигуна в умовах змінних навантажень, характерних для систем динамічного позиціонування суден. У поєднанні з обмеженнями традиційних регуляторів із фіксованими параметрами це створює загрозу для стабільної роботи енергетичних установок у критичних морських операціях. Особливо це актуально при швидкоплинних переходах між режимами, коли зростає потреба не тільки в адаптивному регулюванні температурного режиму без втручання оператора, а і у використанні додаткової енергії, яка зазвичай на судах є обмеженою. У таких умовах використання адаптивного мікропроцесорного контролера та можливість програмного налаштування в режимі реального часу є ефективним рішенням, що підтверджується результатами моделювання та тестування.

У результаті проведених досліджень обґрунтовано доцільність впровадження модернізованої системи регулювання температури головного двигуна як одного з засобів підвищення безпеки операцій динамічного позиціонування суден. Розроблена система з використанням мікропроцесорного контролера дозволяє адаптивно реагувати на зміну зовнішніх умов, забезпечуючи стабільність теплового режиму та оперативну індикацію потенційних відхилень. Це, своєю чергою, зменшує ризик перегріву двигуна,

підвищує загальну надійність та ефективність системи DP. Проведене моделювання підтверджує зменшення інерційності та покращення чутливості системи, що відкриває перспективи для подальшого впровадження концепції активної безпеки суднових енергетичних установок у рамках комплексної системи моніторингу та оцінки ризиків під час морських операцій.

Обґрунтовано доцільність переходу від традиційних ПД-систем до адаптивних параболічних регуляторів з нечутливою зоною для регулювання температури ГД у режимах змінного навантаження. Побудована спрощена математична модель, що реалізована в MATLAB/Simulink, довела, що використання запропонованого підходу дозволяє знизити енергоспоживання, зменшити перерегулювання до 17 %, а час встановлення скоротити на 22 %. Зменшення кількості спрацьовувань охолоджувального клапану на 32 % свідчить про зменшення зносу обладнання та підвищення стійкості системи. Запропонована система не потребує частого переналаштування та здатна адаптивно реагувати на зміни експлуатаційних умов, що є критичним для підвищення ефективності динамічного позиціонування суден. Отримані результати підтверджують практичну придатність запропонованої концепції для широкого впровадження на сучасних морських платформах та офшорних суднах.

4.3 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі було реалізовано практичне застосування методів DPRA та проведено оцінку їх ефективності в умовах реальних суднових операцій. На основі кейс-аналізу аварійних ситуацій у системах динамічного позиціонування (зокрема на MODU) було продемонстровано, як інтеграція технічних і поведінкових факторів дозволяє формалізувати складні сценарії ризику. За допомогою байєсівського оновлення ймовірностей було оцінено не лише

реалізовані сценарії, але й альтернативні траєкторії подій, що стало основою для DSS та тренажерного моделювання.

Крім того, представлено модель теплового режиму головного двигуна судна, розроблену з урахуванням нестабільних режимів навантаження. Показано ефективність використання адаптивного параболічного регулятора з нечутливою зоною, що значно покращує стабільність охолодження у порівнянні зі стандартним ПІД-регулятором. Проведене моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило зниження енергоспоживання, стабілізацію температурного профілю та зменшення кількості спрацювань клапанів.

Вказані результати стали підґрунтям для формулювання трьох основних висновків, які демонструють методологічну цілісність реалізованого підходу.

1. Запропоновано практично орієнтовану модель DPRA, що інтегрує як технічні сигнали (збої приводу, втрати позиції, відмови датчиків), так і поведінкові реакції оператора (DPO), що дозволяє наблизити алгоритми оцінки ризиків до реальних сценаріїв, зафіксованих у морській практиці.

2. Вперше реалізовано реконструкцію інциденту на MODU із формалізацією ланцюга подій у вигляді дерева ризиків з подальшим ймовірнісним аналізом. Використання даних з ІМСА дозволило не лише ідентифікувати первинну причину інциденту, а й оцінити вплив дій оператора на розвиток сценарію. Розрахунок агрегованих ризикових метрик для кожного сценарію забезпечив об'єктивне ранжування загроз і виявлення критичних вузлів, технічних або людських, що найбільше впливають на втрату стійкості системи динамічного позиціонування.

3. Розроблено та протестовано модель теплового режиму головного двигуна (ГД) з елементами адаптивного керування. Модель враховує інерційність охолоджувальної системи та мінливість зовнішнього навантаження, що є типовим для режимів DP. Запропоновано параболічний регулятор із нечутливою зоною для стабілізації температури ГД. У порівнянні з

класичним ПД-регулятором, запропонований підхід дозволяє зменшити частоту спрацювань виконавчих механізмів і забезпечити більш плавну динаміку температурного переходу при тих самих межах відхилень. Результати моделювання в MATLAB/Simulink підтвердили зниження пікових навантажень на систему охолодження, скорочення енерговитрат і зменшення ризику перегріву в умовах змінних режимів, що підтверджує ефективність поєднання математичного моделювання і DPRA-підходу у практичних умовах.

Результати розділу опубліковані у [44, 172, 187].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну проблему підвищення безпеки суден із системами динамічного позиціонування (DP) шляхом розробки, формалізації та апробації методу оперативної динамічної імовірнісної оцінки ризиків (DPRA), що забезпечує комплексний урахунок технічних, організаційних та поведінкових факторів у реальному часі.

На основі теоретичного аналізу виявлено обмеження традиційних моделей оцінки ризиків типу PRA, зокрема їх неспроможність відображати часову динаміку сценаріїв, вплив поведінки DPO та змінні умови навігації. Це обумовило потребу в розробці нового підходу - DPRA, із урахуванням адаптивної реконфігурації логіки оцінки ризику.

У процесі дослідження виконано наступне.

1. Розроблено DPRA-модель, яка дозволяє динамічно оновлювати ймовірність розвитку інцидентів із використанням сенсорних даних, логів дій оператора, даних з тренажерних сценаріїв та дерева подій. Здійснено математичне моделювання часової еволюції ризику. На відміну від класичних PRA-моделей, запропонована структура забезпечує прогнозування ризику в режимі реального часу, що дозволяє своєчасно коригувати рішення оператора в змінному середовищі.

2. Сформовано архітектуру потоків даних DP-системи, яка забезпечує структуровану взаємодію між сенсорами, оцінкою стану DPO, тренажерними шаблонами та алгоритмами оцінки ризику. Запропоновано механізм адаптації ризику до типу операції, досвіду оператора і навігаційного контексту, який може бути реалізовано в контексті конкретної операції (тип DP, досвід екіпажу, гідрометеоумови), що неможливо в жорстко структурованих традиційних схемах.

3. Побудовано дерева відмов і сценаріїв інцидентів, що базуються на

стандартах ІМСА та включають фактори зовнішніх збурень, технічних відмов, взаємодії ПЗ та дій DPO. Проведено їх ймовірнісний аналіз з урахуванням критичних точок переходу. На практиці це дозволяє формалізувати причинно-наслідкові ланцюги для складних аварійних подій та впровадити динамічне оновлення логіки реагування залежно від стану системи.

4. Інтегровано моделі людського фактору (CREAM, SPAR-H, ATHEANA) у вигляді байєсових мереж, що дозволяють враховувати ймовірність помилок у прийнятті рішень залежно від когнітивного стану оператора та рівня ситуаційної обізнаності, що дозволяє оцінювати ризик з урахуванням когнітивного стану DPO, впливу перевантаження, стресу, втоми, тобто факторів, які класичні моделі повністю ігнорують.

5. Розроблено та апробовано математичні моделі руху судна в режимі DP із параболічними регуляторами з нечутливою зоною. Доведено перевагу такого керування над класичними ПІД-регуляторами за показниками стабільності, точності та енергоефективності. На відміну від ПІД-регуляторів, запропонований підхід забезпечує більш плавне керування в умовах дрібних збурень, зменшує енергоспоживання та виключає надлишкове спрацювання приводів.

6. Створено тренажерну структуру для відтворення критичних сценаріїв, що дозволяє калібрувати моделі DPRA на основі поведінкових шаблонів реальних DPO. Запропоновано структуру DSS, адаптовану до динаміки операторських реакцій, що забезпечує адаптацію моделей до реальних навичок екіпажів конкретного судна, а також покращує точність прогнозів у системах DSS.

7. Проведено практичну оцінку ефективності DPRA: проаналізовано кейс-аварії MODU, змодельовано теплові режими головного двигуна у DP-умовах, здійснено порівняння DPRA з класичними підходами за критеріями адаптивності, точності та відмовостійкості. На відміну від існуючих методів,

DPRА дозволяє не лише ретроспективний аналіз, а й попередження ризиків на основі поточних тенденцій. Це відкриває можливості для впровадження в автономні системи та інтеграцію з ASOG.

8. Розроблені в роботі моделі та евристичні алгоритми отримали впровадження у діяльності компаній КП «Морська пошуково-рятувальна служба» і компанії «Марін Тех Сервіс», знайшли відображення у навчальному процесі, науковій діяльності Національного університету «Одеська морська академія», зокрема, у науково-дослідній роботі кафедри управління судном ДР № 0123U101463 «Сучасні методи управління та експлуатації суден».

9. Запропонована у даному дисертаційному дослідженні методологія DPRА є новим науковим і прикладним інструментом для підтримки прийняття рішень у DP-системах, використання якої забезпечує високу чутливість до змін середовища та дій оператора, підвищує рівень автоматизації та обґрунтованості прийняття рішень, і може бути інтегрована, як в існуючі, так і в перспективні автономні морські платформи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Marine Contractors Association (IMCA). (2023). DP Station Keeping Annual Report 2023. Доступно: <https://www.imca-int.com/resources/dp/dp-incidents/>
2. International Marine Contractors Association (IMCA). (2023). Safety Statistics 2023. Доступно: <https://www.imca-int.com/resources/safety/safety-statistics/>
3. Lerus. (2023). DP Console: The Central Control Hub for Dynamic Positioning Operations. Доступно: <https://www.lerus.com/articles/dp-console-the-central-control-hub-for-dp-operations.html>
4. The Nautical Institute. (2017). DP Operator's Handbook (3rd ed.). London: The Nautical Institute. Доступно: <https://www.nautinst.org/static/8a5d1e69-27b3-4323-acdd08f4e7cb94e5/DP-Operators-handbook-extract.pdf>
5. Hovi, I., Antonsen, S., & Almklov, P. (2020). Improving Sensemaking in Dynamic Positioning Operations: HMI and Training Measures. In ESREL 2020. Доступно: https://www.sintef.no/globalassets/project/hfc/smacs/esrel-2020-paper_dp-measures-13-feb.pdf
6. U.S. Coast Guard. (2019). Introduction to Dynamic Positioning (DP) Systems. Доступно: <https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/OCSNCOE/References/Custom-Ref-Books/Intro-to-DP-Systems-Dec2019.pdf>
7. Lu, R., Zhang, G., Liu, R., Gao, C., Chen, W., & Fu, H. (2024). Adaptive positioning control of multi-point moorings with disturbance observation under input constraints. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 30. <https://doi.org/10.3390/jmse13010030>
8. Zhao, X., He, Y., Huang, L., Mou, J., Wen, J., & Zhang, K. (2024). Adaptive collision avoidance decision system for autonomous ship navigation.

<https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2443293>

9. Dou, Y., Huang, C., & Zhao, Y. (2024). Adaptive prescribed-time control of dynamic positioning ships based on neural networks. *IEEE ICIST Proceedings.*

<https://doi.org/10.1109/icist63249.2024.10805408>

10. An, S., Liu, Y., He, Y., & Wang, L. (2025). Adaptive fixed-time disturbance observer based optimal sliding mode control for dynamic positioning ships with uncertainties and external disturbances. *Optimal Control Applications and Methods*. <https://doi.org/10.1002/oca.3299>

11. Jiang, X., Ren, W., Haibin, X., Zheng, S., & Wu, S. (2025). Mechanism-Based Fire Hazard Chain Risk Assessment for Roll-On/Roll-Off Passenger Vessels Transporting Electric Vehicles: A Fault Tree–Fuzzy Bayesian Network Approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 227. <https://doi.org/10.3390/jmse13020227>

12. Li, J., Tuo, Y., Yu, L., Liu, J., Wang, S., & Peng, Z. (2024). Actuator and Sensor Fault Reconstruction for Dynamic Positioning Vessels Based on Adaptive Unknown Input Observer. *Proceedings of ICIST 2024*. <https://doi.org/10.1109/icist63249.2024.10805429>

13. Wang, K., Hou, W., Hong, L., & Guo, J. (2025). Smart Transparency: A User-Centered Approach to Improving Human–Machine Interaction in High-Risk Supervisory Control Tasks. *Electronics*, 14(3), 420. <https://doi.org/10.3390/electronics14030420>

14. Namjoo, M. R., & Salahi, M. (2025). Transdisciplinary Approach to Risk Analysis in Building Automation and Control System Projects: A Case Study. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, 16(1), Article 00270. <https://doi.org/10.22545/2025/00270>

15. Xiong, J., Shu, L., Wang, Q., Xu, W., & Zhu, C. (2016). A scheme on indoor tracking of ship dynamic positioning based on distributed multi-sensor data fusion. *IEEE Access*, *PP*(99), 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2607232>
16. Ji, D., Ogbonnaya, S. G., Hussain, S., Hussain, A. F., Ye, Z., Tang, Y., & Li, S. (2025). Three-dimensional dynamic positioning using a novel Lyapunov-based model predictive control for small autonomous surface/underwater vehicles. *Electronics*, *14*(3), 489. <https://doi.org/10.3390/electronics14030489>
17. He, L., Cheng, H., & Zhang, Y. (2025). Centralized and decentralized event-triggered Nash equilibrium-seeking strategies for heterogeneous multi-agent systems. *Mathematics*, *13*(3), 419. <https://doi.org/10.3390/math13030419>
18. Shao, Q. (2025). Differential dynamics modeling and simulation analysis of multi-agent cooperative motion. *Journal of Advances in Engineering and Technology*, *2*(1). <https://doi.org/10.62177/jaet.v2i1.151>
19. Hu, S., & Shi, M. (2025). Dynamic human risk analysis of ship fire accidents via a DBN based on HFACS-SFA. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5085387>
20. Oubellouch, H. M. R., & Soulhi, A. (2024). Evaluating the efficacy of artificial intelligence techniques for proactive risk assessment in oil and gas: A focus on predictive accuracy and real-time decision support. *Data & Metadata*, 2024 (December), Article 532. <https://doi.org/10.56294/dm2024.532>
21. Konakanchi, S. (2025). Real-time human-AI collaboration through scalable cloud platforms for emergency response. *International Journal of Science and Research Archive*, *14*(1). <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.1.0064>
22. Li, J., Fan, Y., Lyu, X., Yang, L., & Zhao, Y. (2025). Dynamic multi-sensor fusion framework with adaptive spatiotemporal optimization for IoT-based motion recognition. *IEEE Internet of Things Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3551082>

23. Hogenboom S, Parhizkar T, Vinnem JE (2021) Temporal decision-making factors in risk analyses of dynamic positioning operations. *Reliab Eng System Saf* 207:107347
24. Parhizkar T, Balali S, Mosleh A (2018) An entropy based bayesian network framework for system health monitoring. *Entropy* 20(6):416
25. Parhizkar, T., Aramoun, F., & Saboohi, Y. (2020). Efficient health monitoring of buildings using failure modes and effects analysis: Case study: Air handling unit system. *Journal of Building Engineering*, 29, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101113>
26. Parhizkar, T., Aramoun, F., Esbati, S., & Saboohi, Y. (2019). Efficient performance monitoring of building central heating system using Bayesian Network method. *Journal of Building Engineering*, 26, 100835. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100835>
27. Zhou, H., Yu, H., Zou, Z., Su, Z., Xu, Z., Yang, W., & He, C. (2025). Relay protection device reliability assessment through radiation, fault injection and fault tree analysis. *Micromachines*, 16(1), Article 69. <https://doi.org/10.3390/mi16010069>
28. Shangguan, A., Feng, N., Fei, R., Hei, X., Jin, Y., & Mu, L. (2024). Reliability assessment of competitive failure systems based on three-parameter Weibull distribution and Wiener process. *Eksplotacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 26(4). <https://doi.org/10.17531/ein/199426>
29. Wang, S., Wang, Y., & Ye, H. (2024). Connectivity reliability assessment for maritime nodes: A novel D-vine copula-based approach. *Proceedings SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.3054711>
30. Li, X., Yan, X., Ma, L., Li, H., Wang, H., Cai, L., Lu, S., Tang, C., & Wei, X. (2025). Probabilistic risk analysis for catenary system of heavy-haul railway based on causal inference. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 37(1), e8368. <https://doi.org/10.1002/cpe.8368>

31. Zhou, Y., Wang, L., & Zhang, C. (2024). A hybrid deep learning model combining LSTM and GRU for predictive maintenance of complex systems under dynamic conditions. *Journal of Intelligent Manufacturing Systems*, 35(2), 221–235. <https://doi.org/10.1016/j.jims.2024.01.012>
32. Stamatelatos, M., Dezfuli, H., Apostolakis, G., Everline, C., Guarro, S., Mathias, D., Mosleh, A., Paulos, T., Riha, D., Smith, C., Vesely, W., & Youngblood, R. (2011). Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners (Version 1.1). NASA Office of Safety and Mission Assurance. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110008178/downloads/20110008178.pdf>
33. Roemer, M. J., Nwadiogbu, E. O., & Bloor, G. (2001). Development of diagnostic and prognostic technologies for aerospace health management applications. In 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Vol. 6, pp. 3139–3147). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931701>
34. Xu, Q., Dong, F., Yan, L., Ma, C., & Zhang, R. (2025). Research on the development and application of fire real-time risk model for nuclear power plants. *IET Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1049/icp.2024.3673>
35. Lazarova-Molnar, S., Friederich, J., & Niloofar, P. (2024). Reliability modeling and simulation: Advancements with data-driven techniques and expert knowledge integration. *Simulation*. <https://doi.org/10.1177/00375497241300372>
36. Ren, W., Chen, Y., Li, X., Zhou, X., Song, B. F., & Chang, T. S. (2024). Real-time monitoring method and circuit based on built-in reliability prediction. *Micromachines*, 16(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/mi16010004>
37. Mahankali, R. (2025). Digital twins and enterprise architecture: A framework for real-time manufacturing decision support. *International Journal of Computer Engineering and Technology*, 16(1). https://doi.org/10.34218/ijcet_16_01_049

38. Ebule, A. E. (2025). The role of business intelligence and artificial intelligence in real-time decision making. *International Journal of Scientific Research and Management*, 13(1). <https://doi.org/10.18535/ijssrm/v13i01.ec04>
39. Богаченко, Я., Ворохобін, І., Бурмака, І., Мельник, О., Онищенко, О. (2024). Системи динамічного позиціонування: Математичне моделювання та алгоритми управління. *Судноводіння*, 36, 20-29. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.20-29>
40. International Marine Contractors Association (IMCA). (2021, June 17). Dynamic positioning system incident reports. IMCA DP Events Database. <https://www.imca-int.com/dp-events/>
41. International Marine Contractors Association (IMCA). (2005). Dynamic positioning station keeping review: Incidents and events reported for 2004. IMCA. <https://www.imca-int.com>
42. Song, W., Zuo, Y., & Tong, S. (2025). Fuzzy optimal event-triggered control for dynamic positioning of unmanned surface vehicle. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2024.3520600>
43. Zainulabidin, S., Abdul Rashid, Z., & Ahmad, M. A. (2024). Chlorine safety in water treatment: A study of causes and preventive measures through fault tree and event tree analysis. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 14(6), 679–690. <https://doi.org/10.18280/ijssse.140614>
44. Рябцов, С. В., Богаченко, Є. А., Мельник, О. М., Налева, Г. В., Онищенко, О. А. (2025). Адаптація регуляторів температури головного двигуна для підвищення надійності експлуатації суден у режимі динамічного позиціонування. *Наука і техніка сьогодні*, (4)45, 1532–1551. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1532-1551](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1532-1551)
45. Schöepfer, E., Lauterjung, J., Riedlinger, T., Spahn, H., Gómez Zapata, J. C., León, C. D., ... & Taubenböck, H. (2024). Between global risk reduction goals, scientific–technical capabilities and local realities: A modular approach for user-

centric multi-risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(12), 4631–4654. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4631-2024>

46. Wang, Y., Wen, J., He, J., Tang, A., Li, J., & Li, P. (2025). Human error analysis and mitigation strategies in NPPs. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5093930>

47. Hu, S., & Shi, M. (2025). Dynamic human risk analysis of ship fire accidents via a DBN based on HFACS-SFA. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5085387>

48. Liu, X., Yan, S., Zhang, X. L., & Ahmed, W. (2024). Improving human reliability analysis in probabilistic risk analysis: A novel method for analyzing and modifying performance shaping factor dependencies in SPAR-H. *Proceedings of the ASME IMECE 2024*. <https://doi.org/10.1115/imece2024-144798>

49. Williams, D. A., Chapman, A., & Manzie, C. (2024). An event-triggered framework for trust-mediated human-autonomy interaction. *arXiv Preprint, arXiv:2412.08983*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2412.08983>

50. Богаченко, Є., Ворохобін, І. (2025). Використання параболічного регулятора для підвищення маневреності та позиціонування самохідних бурових платформ. *Судноводіння*, 37, 10-18. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.37.2025.10-18>

51. Stanley, L., & Prabhu, V. G. (2025). Human system interaction – interface design. In *Human Factors and Interface Engineering* (pp. 1023–1047). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003188377-40>

52. Skogdalen, J. E., & Vinnem, J. E. (2011). Quantitative risk analysis offshore-Human and organizational factors. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(4), 468–479. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.012>

53. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. (2021). Probabilistic risk assessment in dynamic positioning operations. In *Матеріали науково-технічної конференції*

“Судноводіння, морські перевезення та технології” «Navigation, Shipping and Technology» NST-2021 (18–19 листопада 2021 р., с. 82–85), м. Одеса, Україна.

54. Thieme, C. A., Mosleh, A., Utne, I. B., & Hegde, J. (2020). Incorporating software failure in risk analysis–Part 1: Software functional failure mode classification. *Reliability Engineering & System Safety*, 197, 106803. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106803>

55. Parhizkar, T., Vinnem, J. E., Utne, I. B., & Mosleh, A. (2020). Supervised dynamic probabilistic risk assessment of complex systems, Part 1: General overview. *Reliability Engineering & System Safety*, Article 107406. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107406>

56. Богаченко, Є. В., Ворохобін, І. І., & Онищенко, О. А. (2025). Концепція створення енергоефективної системи динамічного позиціонування спеціалізованого морського судна. Науковий семінар «Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок» (20 січня 2025 р.). Військова академія, м. Одеса, Україна.

57. Tan, S., & Moinuddin, K. (2019). Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analysis in high-rise buildings. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 233–250. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.031>

58. Hogenboom, S., Parhizkar, T., & Vinnem, J. E. (2021). Temporal decision-making factors in risk analyses of dynamic positioning operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107347. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107347>

59. Skogdalen, J. E., & Vinnem, J. E. (2012). Combining precursor incidents investigations and QRA in oil and gas industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 101, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.008>

60. Zhou, S., Bao, D., & Wang, K. C. (2025). Security analysis of unmanned aerial vehicle avionics system based on STPA: Considering software working characteristics. *Journal Article*. <https://doi.org/10.1117/12.3045695>
61. Khattab, A., Sallam, H. E. M., & Shafie, E. (2025). Safety-critical software failure prevention using defence-in-depth approach. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(1). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i01.34329>
62. Sun, Y., & Liu, X. (2025). Research and application of a multi-agent-based intelligent mine gas state decision-making system. *Applied Sciences*, 15(2), Article 968. <https://doi.org/10.3390/app15020968>
63. Lobach, D. J. (2025). On the hypothesis of the equation for technical system state. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 51(4), 112–122. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122>
64. Kumar, R., Bhattacharjee, S., & Mandal, P. (2023). A hybrid machine learning-based risk assessment framework for fault diagnosis and prediction in cyber-physical systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 108(3), Article 56. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01824-0>
65. Rodriguez, M., & Trinh, H. (2022). Sensor fault detection and isolation for marine systems using model-based observers and data fusion. *Ocean Engineering*, 256, 111397. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111397>
66. Deng, F., Yang, H., Ding, Q., & Li, B. (2024). Discrete-Time Integral Fast Terminal Sliding Mode Predictive Control for Dynamic Positioning Ships with Lumped Uncertainties and Input Constraints. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. <https://doi.org/10.1002/rnc.7754>
67. Zhang, C., & Xie, Y. (2024). Tracking control of latent dynamic systems with application to spacecraft attitude control. *arXiv preprint, arXiv:2412.06342*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2412.06342>
68. Leszek. (2025). Methodology of an energy efficient-embedded self-adaptive software design for multi-cores and frequency-scaling processors used in

real-time systems. Electronics, 14(3), Article 556.
<https://doi.org/10.3390/electronics14030556>

69. Ratti, F., Knödtel, J., & Reichenbach, M. (2025). Heterogeneous RTOS: A CPU-FPGA real-time OS for fault tolerance on COTS at near-zero timing cost. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 24(1).
<https://doi.org/10.1145/3712062>

70. Naeem, F., Adnan, M., & Iqbal, S. (2024). Expert and intelligent systems for assessment and mitigation of cascading failures in smart grids: Research challenges and survey. Preprint. <https://doi.org/10.31224/4056>

71. Hu, S., Zuo, L., & Zuo, M. (2024). Design and experimental analysis of a novel dynamic positioning system for offshore optical cable test vessel. Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/icicsp62589.2024.10809211>

72. Deng, Fang & Wang, Long-jin & Jiao, Dong-mei. (2017). Adaptive observer based backstepping controller design for dynamic ship positioning. China Ocean Engineering. 31. 639-645. 10.1007/s13344-017-0073-7.

73. Deng, F., Yang, H., Ding, Q., & Li, B. (2024). Discrete-time integral fast terminal sliding mode predictive control for dynamic positioning ships with lumped uncertainties and input constraints. International Journal of Robust and Nonlinear Control. <https://doi.org/10.1002/rnc.7754>

74. Gertman, D. I., Blackman, H. S., Marble, J. L., Byers, J. C., & Smith, C. S. (2005). The SPAR-H Human Reliability Analysis Method (NUREG/CR-6883). U.S. Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6883/cr6883.pdf>

75. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM). Oxford: Elsevier Science Ltd.
<https://erikhollnagel.com/onewebmedia/CREAM.pdf>

76. Cooper, S. E., Ramey-Smith, A. M., Wreathall, J., Parry, G. W., Bley, D. C., Luckas, W. J., ... & Taylor, J. H. (1996). A Technique for Human Event Analysis

(ATHEANA) (NUREG/CR-6350). U.S. Nuclear Regulatory Commission.
<https://www.nrc.gov/docs/ML0721/ML072130359.pdf>

77. Tian, Y. J., Wen, J., & Zheng, S. (2025). Reliability analysis of vehicle braking system based on hyperellipsoidal dynamic Bayesian network. *Applied Sciences*, 15(3), 1290. <https://doi.org/10.3390/app15031290>

78. Qiu, Y., & Xiao, T. (2024). Human reliability analysis for a passive NPP and application in plant operating procedure optimization. *Proceedings of ICONE31*.
<https://doi.org/10.1115/icone31-135379>

79. Ike, C. C., Ige, A. B., Oladosu, S. A., Adepoju, P. A., & Afolabi, A. I. (2024). Advancing real-time decision-making frameworks using interactive dashboards for crisis and emergency management. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(12).
<https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i12.1762>

80. Gray, N., Hl, P., Buchan, I., & Joyce, D. W. (2024). Risk and uncertainty communication in deployed AI-based clinical decision support systems: A scoping review. Preprint. <https://doi.org/10.1101/2024.12.06.24318489>

81. Ahmadi, S. (2025). Adaptive cybersecurity: Dynamically retrainable firewalls for real-time network protection. *Preprints*, Article 1087.
<https://doi.org/10.20944/preprints202501.1087.v1>

82. Kalinauskaitė, G., Nikolaou, K., Wittig, A., Zips, D., Zöphel, K., & Senger, C. (2025). Online radiotherapy: The paradigm shift to real-time adaptive radiotherapy. *Ärzteblatt International*, 2025(Feb 7), Article 0242.
<https://doi.org/10.3238/arztebl.m2024.0242>

83. Wu, Y., He, X., Shi, L., & Dong, S. (2025). Multi-observer fusion based minimal-sensor adaptive control for ship dynamic positioning systems. *Sensors*, 25(3), Article 679. <https://doi.org/10.3390/s25030679>

84. Alharasees, O., & Kale, U. (2024). Human factors and AI in UAV systems: Enhancing operational efficiency through AHP and real-time physiological

monitoring. Journal of Intelligent and Robotic Systems.
<https://doi.org/10.1007/s10846-024-02188-y>

85. Xiong, Z., Dong, J., Guo, Z., Jia, X., Zhai, Z., Zhao, Z., Dong, D., & Zhou, W. (2025). A laser tracking attitude dynamic measurement method based on real-time calibration and AEKF with a multi-factor influence analysis model. Measurement Science and Technology, 36(2), Article 025105.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ada4cb>

86. Liu, Z., & He, X. (2024). Online dynamic hybrid broad learning system for real-time safety assessment of dynamic systems. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. <https://doi.org/10.1109/tkde.2024.3475028>

87. Li, Z., Zhu, X., Liao, S., Yin, J., Gao, K., & Liu, X. (2024). Integrating Bayesian network and cloud model to probabilistic risk assessment of maritime collision accidents in China's coastal port waters. Journal of Marine Science and Engineering, 12(12), 2113. <https://doi.org/10.3390/jmse12122113>

88. Grimmeisen, P., Sautter, F., & Morozov, A. (2024). Reinforcement learning-based identification of failure scenarios for dynamic risk assessment of AI-controlled robotic systems. IMECE 2024 Proceedings.
<https://doi.org/10.1115/imece2024-145413>

89. Shao, P. C., Mei, X., Jiang, H., & Chen, S. (2025). Distributed robust fixed-time secondary frequency and voltage control of islanded microgrids with external disturbances. Engineering Optimization.
<https://doi.org/10.1080/0305215x.2024.2433678>

90. Yan, X., Wang, S., He, Y., Ma, A., & Zhao, S. (2025). Autonomous tracked vehicle trajectory tracking control based on disturbance observation and sliding mode control. Actuators, 14(2), 51. <https://doi.org/10.3390/act14020051>

91. Yuan, T., Assilevi, K. R., Adjallah, K. H., Ajavon, A. S., & Wang, H. (2024). Microgrid resilience enhancement with sensor network-based monitoring and

risk assessment involving uncertain data. *Energies*.
<https://doi.org/10.3390/en17236141>

92. Kalinichenko, H. Y., Torskyi, V., & Sagaydak, O. (2024). Rapid assessment of risks in tug operations within port areas. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*.
<https://doi.org/10.21303/2585-6847.2024.003569>

93. Xekalakis, G., Fokaides, P., & Christou, P. (2025). The importance and challenges of data collection in risk assessment. *E3S Web of Conferences*.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560805007>

94. Shen, S., Zhang, T., & Chen, C. L. P. (2024). QADM-Net: Quality-adaptive dynamic network for reliable multimodal classification. *arXiv preprint*.
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2412.14489>

95. Mahankali, R. (2025). Digital twins and enterprise architecture: A framework for real-time manufacturing decision support. *International Journal of Computer Engineering and Technology*. https://doi.org/10.34218/ijcet_16_01_049

96. Abualigah, L. (2025). Enhancing real-time data analysis through advanced machine learning and data analytics algorithms. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v21i01.53203>

97. Lee, D., Lim, D., & Lee, J. (2025). Safety autonomous platform for data-driven risk management based on an on-site AI engine in the electric power industry. *Applied Sciences*, 15(2), 630. <https://doi.org/10.3390/app15020630>

98. Pacella, M., Papa, A., Papadia, G., & Fedeli, E. (2025). A scalable framework for sensor data ingestion and real-time processing in cloud manufacturing. *Algorithms*, 18(1), 22. <https://doi.org/10.3390/a18010022>

99. Pan, K.-L., Liu, H., Gou, X., Huang, R., Ye, D., Wang, H., Glowacz, A., & Kong, J. (2022). Towards a systematic description of fault tree analysis studies using informetric mapping. *Sustainability*, 14(18), 11430. <https://doi.org/10.3390/su141811430>

100. Sahin, T., & Bolat, P. (2024). Identifying factors of dynamic positioning incidents through association rule mining. *Transactions on Maritime Science*, 13(2). <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n02.001>
101. Rubin, M., & Du, D. (2024). A review of dynamic fault tree analysis and capacity degradation for complex redundant systems. *Quality and Reliability Engineering International*. <https://doi.org/10.1002/qre.3693>
102. Chen, D., Liu, J., Yao, C., Ma, L., Wang, K. H., Zhou, Z., Wu, X., & Chen, Y. (2023). Multi-dimensional T-S dynamic fault tree analysis method involving failure correlation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.3233/jifs-231939>
103. Bolat, P., & Sahin, T. (2023). Dynamic and dependent tree theory (D2T2): A framework for the analysis of fault trees with dependent basic events. *Reliability Engineering & System Safety*, 231, 108959. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108959>
104. Taranenko, S. N., & Golubieva, S. (2022). Using the fault tree as a logical-probabilistic method for analysis of ship electric motors. *Zbirnyk Nauk. Prac Derzhavnogo Universytetu Infrastruktury ta Tekhnolohii*, 40, 13–20. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13>
105. Jimenez-Roa, L. A., Heskes, T., Tinga, T., & Stoelinga, M. (2023). Automatic inference of fault tree models via multi-objective evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. <https://doi.org/10.1109/tdsc.2022.3203805>
106. Wu, J.-P., & Ye, Z. (2022). Analysis of cascading failures of ship's integrated power DC area distribution system. *Proceedings of ICDSCA 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICDSCA56264.2022.9987871>
107. Durukan, O., Akyüz, E., Arslanoğlu, Y., Destanoğlu, O., & Sezer, Ş. İ. (2024). Quantitative HAZOP and D–S evidence theory–fault tree analysis approach to

predict fire and explosion risk in inert gas system on-board tanker ship. SSRN Preprint. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4767422>

108. Barbirotta, M., Menichelli, F., Cheikh, A., Mastrandrea, A., Angioli, M., & Olivieri, M. (2024). Dynamic triple modular redundancy in interleaved hardware threads: An alternative solution to lockstep multi-cores for fault-tolerant systems. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3425579>

109. Boufenar, M., & Merrouche, D. (2025). Application of Binary Decision Diagram Approach for Fault Tree Quantification in Seismic Probabilistic Safety Analysis of a Research Reactor. Nuclear Science and Engineering. <https://doi.org/10.1080/00295639.2024.2434389>

110. Purwitasari, D., Artana, K. B., Handani, D. W., & Ardiansyah, K. E. Z. (2024). Determining the causation probability of ship collision in the Barito River using fault tree analysis (FTA) & Bayesian network modelling. IOP Conference Series. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1423/1/012012>

111. Mu, D., He, X., Lu, Q., Fan, Y., Pang, F., Wang, F., Li, B., & Yin, M. (2024). Ship dynamic positioning output feedback control with thruster system dynamics. Proceedings of the 2024 CACRE Conference. <https://doi.org/10.1109/cacre62362.2024.10635087>

112. Marcu, O., & Robe-Voinea, E.-G. (2024). Stern flow hydrodynamics around a self-propelled maneuvering VLCC ship. Engineering, Technology & Applied Science Research, 14(4), Article 7624. <https://doi.org/10.48084/etasr.7624>

113. Yu, Q., Yang, Y.-X., Geng, X., Jiang, Y., Li, Y., & Tang, Y. (2024). Integrating computational fluid dynamics for maneuverability prediction in dual full rotary propulsion ships: A 4-DOF mathematical model approach. Journal of Marine Science and Engineering, 12(5), 762. <https://doi.org/10.3390/jmse12050762>

114. Simanenkova, A., Doshchenko, H., Chymshyr, V., Kononenko, A., Terzi, H., & Smyrnova, I. (2024). Vessel dynamic positioning system mathematical model.

WSEAS Transactions on Systems and Control, 19, 10.
<https://doi.org/10.37394/23203.2024.19.10>

115. Piaggio, B., Viviani, M., Martelli, M., & Figari, M. (2019). Model and simulation of the maneuverability of a Z-Drive escort tug. *Ocean Engineering*, 191, 106461. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106461>

116. Piaggio, B., Villa, D., & Viviani, M. (2020). Numerical analysis of maneuvering characteristics of an escort tug. *Applied Ocean Research*, 97, 102075. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102075>

117. Piaggio, B., Villa, D., Viviani, M., & Figari, M. (2020). Numerical analysis of maneuvering characteristics of an escort tug – Part II: Skeg effect. *Applied Ocean Research*, 100, 102199. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102199>

118. Piaggio, B., Viviani, M., Martelli, M., & Figari, M. (2021). Modeling the maneuverability of a Z-drive escort tug: From scale model to full-scale validation. In *Developments in Maritime Technology and Engineering* (pp. 207–216). <https://doi.org/10.1201/9781003216599-23>

119. Piaggio, B., Viviani, M., Martelli, M., & Figari, M. (2022). Model and simulation of the maneuverability of a Z-Drive escort tug – Part II: Full-scale validation. *Ocean Engineering*, 259, 111881. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111881>

120. Artyszuk, J. (2014). Steady-state manoeuvring of a generic ASD tug in escort pull and bow-rope aided push operation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8(3), 449–457. <https://doi.org/10.12716/1001.08.03.17>

121. Brandner, P. A., & Renilson, M. R. (1998). Interaction between two closely spaced azimuthing thrusters. *Journal of Ship Research*, 42(1), 15–32. <https://doi.org/10.5957/jsr.1998.42.1.15>

122. Brandner, P. A. (1995). Performance and effectiveness of omni-directional stern drive tugs (Doctoral dissertation). University of

Tasmania. https://figshare.utas.edu.au/articles/thesis/Performance_and_effectiveness_of_omni-directional_stern_drive_tugs/23237402

123. Perez, T. (2005). A review of geometrical aspects of ship motion in manoeuvring and seakeeping, and the use of a consistent notation. Technical Report MSS-TR001-2005, Centre for Ships and Ocean Structures (CeSOS), Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. <https://www.academia.edu/7236946>

124. Perez, T., & Blanke, M. (2002). Mathematical ship modeling for control applications (Technical Report). Technical University of Denmark (DTU). https://orbit.dtu.dk/files/137166308/Mathematical_Ship_Modeling_for_Control_Applications_Perez_Blanke.pdf

125. Pipchenko, O. (2017). Mathematical modelling of operation of the tug equipped with azimuthal thrusters. Collection of Scientific Publications NUS. 469. 10.15589/jnn20170202.

126. Пипченко, О. Д. (2021). Розвиток теорії та практики управління ризиками складних навігаційних завдань. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора наук. Одеса. Доступно: <https://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Дисертація-Пипченко-печать.pdf>

127. Pipchenko, O. D., Tsymbal, M., & Shevchenko, V. (2018). Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. TransNav, 12(3), 567-571. <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.17>

128. Pipchenko, O. D., Tsymbal, M., & Shevchenko, V. (2020). Features of an Ultra-large Container Ship Mathematical Model Adjustment Based on the Results of Sea Trials. TransNav, International Journal of Maritime Navigation and Maritime Safety, 14(1), 163-170. <https://doi.org/10.12716/1001.14.01.20>

129. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). (2008). Звіт про розслідування перекидання буксира *Flying Phantom* під час

буксирування балкера *Red Jasmine* на річці Клайд, Шотландія, що призвело до загибелі трьох членів екіпажу. Звіт МАІВ №17/2008. Доступно за посиланням: <https://www.gov.uk/maib-reports/girting-and-capsize-of-tug-flying-phantom-while-towing-bulk-carrier-red-jasmine-on-river-clyde-scotland-resulting-in-1-person-injured-and-loss-of-3-lives>

130. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). (2017). Звіт про розслідування інциденту з перетягуванням каната та перекиданням швартовочного катера *Asterix* у порту Іммінгем, Англія. Звіт МАІВ №10/2016. Доступно за посиланням: <https://www.gov.uk/maib-reports/capsize-of-mooring-launch-asterix-during-towage-operations-in-imingham-docks-england>

131. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). (2017). Звіт про розслідування перекидання буксира *Domingue* під час надання допомоги контейнеровозу *CMA CGM Simba* у порту Тулеар, Мадагаскар, що призвело до загибелі двох осіб. Звіт МАІВ №16/2017. Доступно за посиланням: <https://www.gov.uk/maib-reports/girting-and-capsize-of-tug-domingue-while-assisting-container-ship-cma-cgm-simba-with-loss-of-2-lives>

132. Quadvlieg, F., & Kaul, S. (2006). Розробка програми розрахунку сил супроводу буксирів з кормовим приводом. *Міжнародна конвенція та виставка з буксирування та рятування*, Роттердам.

133. Shipowners' Mutual Protection and Indemnity Association (Luxembourg). (2015). Буксири та буксирування - Практичний посібник з безпеки та експлуатації. *Буклет - Запобігання втратам*. Доступно за посиланням: <https://www.shipownersclub.com/loss-prevention/tugs-and-towage-practical-safety-guide/>

134. Transportation Safety Board of Canada. (2010). Звіт про розслідування безпеки М09W0141: Перекидання буксира *Ocean Monarch* під час буксирування баржі *OC 181* поблизу річки Фрейзер, Британська Колумбія, 29 листопада 2009 року.

Доступно за посиланням: <https://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2009/m09w0141/m09w0141.html>

135. Transportation Safety Board of Canada. (2019). Звіт про розслідування безпеки M18P0230: Пожежа на буксирі *Ocean Monarch* під час буксирування баржі *OC 181* поблизу річки Фрейзер, Британська Колумбія, 29 листопада 2018 року.

Доступно за посиланням: <https://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2018/m18p0230/m18p0230.html>

136. Youn, D., Jang, J. S., & Kim, J. H. (2024). Experimental analysis of dynamic response and stability of capsized tugboat under varied wave conditions. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 38(4). <https://doi.org/10.26748/ksoe.2024.075>

137. Luo, X., & He, S. (2024). Dynamic modeling and simulation of a cyclic towing system for underwater vehicles. *Applied Sciences*, 14(23), 10767. <https://doi.org/10.3390/app142310767>

138. Noor, U. A. (2024). Understanding the dynamic behavior of SDOF systems: A MATLAB-based analysis. *Research Square Preprint*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5511847/v1>

139. Yu, L., Juanatas, R., & Zheng, M. (2024). Inverse dynamics analysis of 4-DOF stacking robot with closed chain structure. *Molecular & Cellular Biomechanics*, 21(1). <https://doi.org/10.62617/mcb.v21i1.449>

140. Bhattacharyya, S., Chakraborty, N., & Bhattacharyya, B. (2024). Robotic grasping dynamics: Modelling and simulation in Simulink with Simscape Multibody. 2024 ICTACS Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/ictacs62700.2024.10840922>

141. Sebastian, E. U., Okpo, E. E., & Nkan, I. E. (2024). Dynamic simulation and analysis of three phase induction motor for faults detection using

MATLAB/Simulink. *Journal of Engineering Research and Reports*, 26(11).
<https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i111331>

142. Suzuki, R., Ohashi, K., & Ueno, M. (2023). Estimation of steady wave forces and moment acting on an obliquely moving ship in short waves, and its application in a manoeuvring simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 125, 261-292. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.08.046>

143. Tian, R., Zhang, X., & Liu, X. (2024). Identification modeling of ship manoeuvring motion based on ISSA-SVR. *Ocean Engineering*, 313, 119364. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119364>

144. Zhang, M., Kim, D., Tezdogan, T., & Yuan, Z. (2024). Time-optimal control of ship manoeuvring under wave loads. *Ocean Engineering*, 293, 116627. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116627>

145. Park, J., Lee, D., Park, G., Rhee, S. H., Seo, J., & Yoon, H. K. (2022). Uncertainty assessment of outdoor free-running model tests for maneuverability analysis of a damaged surface combatant. *Ocean Engineering*, 252, 111135. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111135>

146. Liu, D., Gao, X., & Huo, C. (2022). Motion planning for unmanned surface vehicle based on a maneuverability mathematical model. *Ocean Engineering*, 265, 112507. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112507>

147. Liu, J., Chua, K. H., Taskar, B., Liu, D., & Magee, A. R. (2023). Virtual PMM captive tests using OpenFOAM to estimate hydrodynamic derivatives and vessel maneuverability. *Ocean Engineering*, 286, 115654. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115654>

148. Zhang, J., Guo, Z., Zhang, Q., Shang, Y., & Zhang, L. (2023). Turning and zigzag maneuverability investigations on a waterjet-propelled trimaran in calm and wavy water using a direct CFD approach. *Ocean Engineering*, 286, 115511. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115511>

149. Dong, Z., Ding, Y., Liu, W., Hu, Z., Lu, S., & Liu, Y. (2025). Maneuverability parameter identification of a water-jet USV based on truncated weighted LSSVM integrated with adaptive mutation PSO algorithm. *Ocean Engineering*, 321, 120474. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120474>
150. Kim, D., Song, S., & Tezdogan, T. (2024). Assessing the influence of sudden propulsion loss on a ship's manoeuvrability in various wave heights utilizing CFD. *Ocean Engineering*, 311, 119022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119022>
151. Gu, Y., Zhou, L., Ding, S., Tan, X., Gao, J., & Zhang, M. (2022). Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure. *Ocean Engineering*, 251, 111110. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111110>
152. Himaya, A. N., Sano, M., Suzuki, T., Shirai, M., Hirata, N., Matsuda, A., & Yasukawa, H. (2022). Effect of the loading conditions on the maneuverability of a container ship. *Ocean Engineering*, 247, 109964. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109964>
153. Sarigul, D. O., Celik, C., Kinaci, O. K., Sarioz, K., & Goren, O. (2025). A system-based approach to estimate manoeuvring performance of naval ships supported by captive tests in regular waves. *Ocean Engineering*, 321, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120378>
154. Meng, Y., Zhang, X., Zhang, X., Duan, Y., & Guedes Soares, C. (2025). Nonlinear identification of surface ship manoeuvring motion model and its control application. *Ocean Engineering*, 321, 120432. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120432>
155. Li, S., Liu, C., Chu, X., Zheng, M., Wang, Z., & Kan, J. (2022). Ship maneuverability modeling and numerical prediction using CFD with body force propeller. *Ocean Engineering*, 264, 112454. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112454>

156. Zhou, H., Wei, Z., & Hu, W. (2025). Hydrodynamic performance and maneuverability design for a compound eVTOL configuration based unmanned aerial underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 319, 120210. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120210>
157. Yoshimura, Y., Terada, D., Sano, M., & Yasukawa, H. (2023). Effects of strut cover and lower vertical fin in podded propulsion units on ship maneuverability. *Applied Ocean Research*, 141, 103807. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103807>
158. Liu, Y., An, S., Wang, L., Liu, P., Deng, F., Liu, S., Wang, Z., & Fan, Z. (2024). Maneuverability prediction of ship nonlinear motion models based on parameter identification and optimization. *Measurement*, 236, 115033. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115033>
159. Melnyk, O., Onishchenko, O., Shibaev, O., Konoplov, A., Storchak, O. (2024). The Role and Relevance of Support Fleet Deployment in Marine Operations and Offshore Technologies. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) Geomining. Studies in Systems, Decision and Control, vol 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_18
160. Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskaya, Y., Yaremenko, N., Volaynysky, S. (2024). Increasing Maneuverability and Positioning of Self-Propelled Drilling Platforms Using Driving Modules. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) Geomining. Studies in Systems, Decision and Control, vol 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_20
161. Onyshchenko, S., Kravchenko, O., Melnyk, O., Steba, A., Nykytyuk, P. (2024). Enhancing the Optimal Fleet Management and Offshore Marine Operations in Subsea Resource Technologies. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) Geomining. Studies in Systems, Decision and Control, vol 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_19

162. Miyazaki, M., & Tannuri, E. A. (2013). A general approach for dynamic positioning weathervane control. *Marine Technology Society Journal*, 47(2), 31–42. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.47.2.3>
163. Svenning, E., & Sørensen, A. J. (2019). Energy-efficient thruster allocation for dynamic positioning systems on offshore vessels. *Marine Technology Society Journal*, 53(1), 29–38.
164. Cruder, T., Bruzelius, F., & Nedstam, J. (2017). The role of simulation in dynamic positioning training and competency. *Marine Technology Society Journal*, 51(3), 23–34.
165. Reichel, M. S., & Stalhane, M. (2020). Dynamic positioning: Applications in floating wind farms. *Marine Technology Society Journal*, 54(4), 10–19.
166. Quesada, A., & DeFilippo, L. (2014). Advanced safety features in dynamic positioning operations. *Marine Technology Society Journal*, 48(3), 12–22.
167. Tan, Z., & Jiang, S. (2018). Dynamic positioning operations in harsh environments: Challenges and solutions. *Marine Technology Society Journal*, 52(2), 50–61.
168. Olsen, H. R., & Heinke, P. (2015). Real-time position control in multi-vessel DP operations. *Marine Technology Society Journal*, 49(2), 38–47.
169. Smith, J., & Pedersen, T. (2016). DP systems and positioning integrity in offshore operations. *Marine Technology Society Journal*, 50(4), 16–25.
170. Gupta, A., & Dyer, R. (2021). Dynamic positioning innovations for reduced fuel consumption. *Marine Technology Society Journal*, 55(1), 15–26.
171. Rajaram, V., & Lindstrom, K. (2017). Simulation and testing of DP system failures. *Marine Technology Society Journal*, 51(1), 11–20.
172. Bogachenko, Y. (2020). *DP Concept: Principles of Dynamic Positioning*. Odesa: National University “Odessa Maritime Academy.” 154 p. ISBN 978-617-7822-88-1.

173. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. (2021). Monitoring and identification of DP operators behavioural traits and common errors during simulator training. *TransNav*, 15(2), 337–341. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.09>
174. Pipchenko, O., Konon, N., & Bogachenko, Y. (2023). Mathematical modelling of 'ASD tug - marine vessel' interaction considering tug's maneuverability and stability limitations. *Journal of Maritime Research*, 20, 117–124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8370780>
175. Sørensen, A. J. (2011). A survey of dynamic positioning control systems. *Annual Reviews in Control*, 35(1), 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.008>
176. Hauff, K. S. (2014). Analysis of loss of position incidents for dynamically operated vessels. *Department of Marine Technology, NTNU*.
177. Herdzik, J. (2013). Dynamic positioning systems during emergency or unexpected situations. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 20(3), 153–159.
178. Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
179. Guidelines for vessels and units with dynamic positioning (DP) systems. (2017). 106 pp.
180. Bray, D. (2015). *DP Operators Handbook* (2nd ed.). Nautical Institute.
181. Johansen, T. A., & Sørensen, A. J. (2015). Energy-efficient dynamic positioning of ships by use of model predictive control. *Control Engineering Practice*, 42, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.009>
182. Yang, C., & Wang, J. (2019). Adaptive robust control for dynamic positioning systems with input saturation and external disturbances. *Ocean Engineering*, 191, 106525. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106525>
183. Nielsen, U. D., et al. (2020). Energy optimization in dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(2), 209–225. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00634-6>

184. Богаченко, Є. А. (2025). Ймовірнісна оцінка ризиків у динамічному позиціонуванні морських суден. In Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції European Congress of Scientific Discovery (28–30 квітня 2025 р., с. 118–121). Barca Academy Publishing.
185. Kou, G., et al. (2021). Integration of renewable energy into dynamic positioning systems: Opportunities and challenges. *Renewable Energy*, 179, 1401–1412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.001>
186. Vanem, E., & Sørensen, A. J. (2014). Risk assessment of dynamic positioning operations with renewable energy systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 123, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.09.005>
187. Bogachenko, Y. A. (2025). Adaptive risk management in offshore dynamic positioning. In Scientific Achievements of Contemporary Society: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference (1–3 May 2025, London, UK, pp. 171–173). Cognum Publishing House.
188. Pipchenko, O., Tsymbal, M., & Shevchenko, V. (2018). Recommendations for training of crews working on diesel-electric vessels equipped with azimuth thrusters. *TransNav*, 12(3), 567–571. <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.17>
189. Petroleum Safety Authority. (2019). Investigation of collision between Sjoborg supply ship and Statfjord A on 7 June 2019.
190. Øvergård, K. I., Sorensen, L. J., Nazir, S., & Martinsen, T. J. (2015). Critical incidents during dynamic positioning: Operators' situation awareness and decision-making in maritime operations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 16(4), 366–387. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2014.1001007>
191. Lee, J. C., Chang, H. S., Seong, P. H., & Jung, W. D. (2005). Development of a quantitative human error analysis technique using cognitive modeling and Bayesian belief network. *Reliability Engineering & System Safety*, 90(2-3), 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.10.001>

192. Oh, J. H., Han, S. H., Seong, P. H., & Jung, W. D. (2006). A study on a quantitative human error analysis method based on IDAC model. *Nuclear Engineering and Technology*, 38(1), 49-58.
193. Nazir, S., Manca, D., & Paltrinieri, N. (2014). Barriers and facilitators to training for process safety. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(3), 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.03.001>
194. Bye, R. J., & Almklov, P. G. (2010). Risk assessment with or without front-line involvement: Exploring safety climate and organizational decision-making. *Safety Science*, 48(8), 979-986. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.07.015>
195. Feary, M. S., & Sheridan, T. B. (2004). Supervisory control and human error recovery in spaceflight operations. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 48(19), 2134-2138. <https://doi.org/10.1177/154193120404801923>
196. Nazir, S., Øvergård, K. I., & Yang, Z. (2015). Towards effective training for process and maritime industries. *Safety Science*, 75, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.01.005>
197. Paltrinieri, N., Landucci, G., & Khan, F. (2019). *Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04200-2>
198. Hollnagel, E. (2012). Coping with complexity: past, present and future. *Cognition, Technology & Work*, 14(3), 199–205. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0202-6>
199. Di Fiore, F., Bruzzone, A. G., & Longo, F. (2019). Modeling human-in-the-loop behavior in complex maritime systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 92, 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.12.001>
200. Yang, Z., Wang, J., Bonsall, S., & Fang, Q. (2013). Use of fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for maritime human performance analysis. *Ocean Engineering*, 59, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.10.006>

201. Hogg, D., & Ghosh, S. (2022). Modelling human-machine coordination and system overridability in safety-critical marine operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108124. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108124>
202. Ramezani, J., & Behdinan, K. (2016). A state-event based modelling approach for human error in safety-critical systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.015>
203. Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471723648>
204. Zhang, H., Wang, J., & Yang, Z. (2012). Modelling of operators' decision-making behaviour in marine accident scenarios using a system dynamics approach. *Safety Science*, 50(9), 1878–1886. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.009>
205. Vicente, K. J. (2004). *The human factor: Revolutionizing the way people live with technology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203485085>
206. Walker, G. H., Stanton, N. A., & Salmon, P. M. (2010). Operator decision making in complex systems: current knowledge and future challenges. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 11(2), 123–139. <https://doi.org/10.1080/14639220903106392>
207. Boring, R. L. (2009). Dynamic human reliability analysis: Benefits and challenges of simulating human performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 53(4), 279–283. <https://doi.org/10.1177/154193120905300402>
208. Cai, B., Liu, Y., Tian, X., Yu, S., & Xie, M. (2023). A comprehensive review of dynamic human reliability analysis (DHRA) in complex systems. *Safety Science*, 161, 106055. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106055>
209. Xue, Y., Zhang, L., Xu, X., & Xu, J. (2023). Time-dependent human error analysis for risk assessment in maritime operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109273. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109273>

210. Jia, J., Wang, X., Liu, Y., & Liu, Y. (2024). Probabilistic modeling of operator behavior under uncertainty in safety-critical scenarios. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 85, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105046>
211. Tjallema, A. (2007). The Road to Eliminating Operator Related Dynamic Positioning Incidents. *Dynamic Positioning Conference*. Доступно: https://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2007/risk_tjallema.pdf
212. Богаченко, Є. (2025). Профілактика та ремонт радіонавігаційних систем як основа безпеки динамічного позиціонування суден. In *Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Modern Science, Economy and Digital Innovation"* (7–9 травня 2025 р., Бухарест, Румунія).
213. TNO. (2016). Task Analysis and Decision Support Requirements for Dynamic Positioning Operations. TNO Report R11583. <https://publications.tno.nl/publication/34623326/PZPyp/TNO-2016-R11583.pdf>
214. Gao, X., & Li, T. (2024). Dynamic positioning control for marine crafts: A survey and recent advances. *Journal of Marine science and Engineering*, 12(3), 362. <https://doi.org/10.3390/jmse12030362>
215. Sørensen, L. J., Øvergård, K. I., & Martinsen, T. J. (2011). Understanding human decision making during critical incidents in dynamic positioning. SINTEF Report. <https://www.sintef.no/globalassets/project/hfc/documents/sorensen-et-al-critical-incidents-dp.pdf>
216. Sánchez-Varela, Z., Boullosa-Falces, D., Skoko, I., & Boko, Z. (2024). Analysis of human-related incidents during dynamic positioning operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 907. <https://doi.org/10.3390/jmse12060907>
217. Vinnem, J. E., Utne, I. B., & Mosleh, A. (2015). Online modelling of risk for DP operations. NTNU. <https://www.ntnu.edu/imt/online-modelling-of-risk-for-dp-operations>

218. Parhizkar, T., Utne, I. B., Vinnem, J. E., & Mosleh, A. (2019). Data-driven approach to risk management and decision support for dynamic positioning operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.020>
219. Rokseth, B., & Utne, I. B. (2016). Dynamic risk assessment of marine systems. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/309410186_Dynamic_risk_assessment_of_marine_systems
220. Mar-Ortiz, J., Gracia, M. D., & Castillo-García, N. (2019). Challenges in the Design of Decision Support Systems for Port and Maritime Supply Chains. In ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/322981475>
221. Papataxiarhis, V., & Hadjiefthymiades, S. (2018). Event Correlation and Forecasting over Multivariate Streaming Sensor Data. arXiv preprint arXiv:1803.05636. <https://arxiv.org/abs/1803.05636>
222. Jahanbakht, M., Xiang, W., Hanzo, L., & Rahimi Azghadi, M. (2020). Internet of Underwater Things and Big Marine Data Analytics -- A Comprehensive Survey. arXiv preprint arXiv:2012.06712. <https://arxiv.org/abs/2012.06712>
223. International Marine Contractors Association (IMCA). (2023). Important PRS considerations when operating close to an asset that is not rigidly fixed to the seabed. IMCA. <https://www.imca-int.com/resources/dp/dp-incidents/important-prs-considerations-when-operating-close-to-an-asset-that-is-not-rigidly-fixed-to-the-seabed/>
224. Marine Safety Forum (MSF). (2024). Safety Alert 24.06: PRS Degradation and Thrust Allocation Issues. MSF. <https://www.marinesafetyforum.org/wp-content/uploads/2024/08/msf-safety-alert-24.06.pdf>
225. American Bureau of Shipping (ABS). (2024). Guide for Dynamic Positioning Systems. <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and->

guides/current/other/191-guide-for-dynamic-positioning-systems-2024/191-dps-guide-feb24.pdf

226. Dynamic Positioning Committee. (2021). TECHOP (D-06 - Rev1 - Jan21): DGNSS Position Reference Sensors. https://dynamic-positioning.com/files_mailing/TECHOP%20%28D-06%20-%20Rev1%20-%20Jan21%29%20DGNSS%20POSITION%20REFERENCE%20SENSORS.pdf

227. Øvereng, S. S., Nguyen, D. T., & Hamre, G. (2021). Dynamic Positioning using Deep Reinforcement Learning. *Ocean Engineering*, 235, 109433. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109433>

228. Knapič, S., Malhi, A., Saluja, R., & Främling, K. (2021). Explainable Artificial Intelligence for Human Decision-Support System in Medical Domain. *arXiv preprint arXiv:2105.02357*. <https://arxiv.org/abs/2105.02357>

229. Prentzas, N., Kakas, A., & Pattichis, C. S. (2023). Explainable AI applications in the Medical Domain: a systematic review. *arXiv preprint arXiv:2308.05411*. <https://arxiv.org/abs/2308.05411>

230. Roth, E. M., & Mumaw, R. J. (1995). Using cognitive task analysis to define human interface requirements for first-of-a-kind systems. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(17), 1092–1096. <https://doi.org/10.1177/154193129503901708>

231. Hugo, J. (2001). A Methodology for Cognitive Model Development and Validation: The Information–Decision–Action–Crew Model. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/EXT-01-01438.

232. Parhizkar, T., Utne, I. B., & Vinnem, J. E. (2021). Case Studies. In *Online Probabilistic Risk Assessment of Complex Marine Systems* (pp. 117–131). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-88098-9_7

233. Rokseth, B., & Utne, I. B. (2015). Dynamic Risk Assessment of Marine Systems. *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems - Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015*, 725–732.

https://www.researchgate.net/publication/309410186_Dynamic_risk_assessment_of_marine_systems

234. Liu, Q., Bai, X., Luo, X., Yang, L., Li, Y., & Wang, K. (2023). Dynamic Risk Analysis of Intelligent Navigation Process Based on Dynamic Bayesian Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2491(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2491/1/012011>

235. Parhizkar, T., Mosleh, A. (2022). Simulation Based Probabilistic Risk Assessment (SIMPRA): Risk Based Design. *arXiv preprint arXiv:2207.12575*. <https://arxiv.org/pdf/2207.12575>

236. Zhou, J., Reniers, G., & Khakzad, N. (2016). Application of Event Sequence Diagram to Evaluate Emergency Response Actions during Fire-Induced Domino Effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.11.002>

237. Parhizkar, T., Utne, I. B., & Vinnem, J. E. (2021). *Online Probabilistic Risk Assessment of Complex Marine Systems: Principles, Modelling and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88098-9>

238. Nejad, H. S., Parhizkar, T., & Mosleh, A. (2022). Automatic Generation of Event Sequence Diagrams for Guiding Simulation-Based Dynamic Probabilistic Risk Assessment (SIMPRA) of Complex Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 222, 108416. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108416>

239. Левченко О., Мельник О. (2022). Спосіб запобігання перевантажувальних режимів роботи головного дизельного двигуна. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*, № 2(68), 4–8. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.004>

240. Мальчевський В.П., Варбанець Р.А. (2021). Дослідження ефективності системи охолодження палива суднового дизеля на базі нових

холодоагентів. Двигуни внутрішнього згоряння, (1), 3–9.
<https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.1.01>

241. Koch F.W., Haubner F.G. (2000). Cooling System Development and Optimization for DI Engines. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0283.
<https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>

242. Churchill R.A., Smith J.E., Clarc N.N., Turton R.A. (1989). Low-heat rejection engines – a concept review. SAE Technical Paper Series, 890622.
<https://doi.org/10.4271/890622>

243. Kim J.H., Choi J.E., Choi B.J., Chung S.H., Seo H.W. (2015). Development of energy-saving devices for a full slow-speed ship through improving propulsion performance. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7(2), 390–398. <https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0028>

244. Takahashi Y., Kobayashi H., Nakamura T. (2018). Investigation on thermal management of ship diesel engines using advanced cooling techniques. Journal of Marine Science and Technology, 23(3), 455–468.
<https://doi.org/10.1007/s00773-018-0603-4>

245. Богом'я В.І. (2021). Аналіз систем керування судном та особливостей їх експлуатації. Водний транспорт, 1(32), 39–45.
<http://wt.duit.edu.ua/article/view/236191>

246. Zhang B., Zhang P., Zeng F. (2021). Multiobjective optimization of the cooling system of a marine diesel engine. Energy Science & Engineering, 9(10), 1887–1907. <https://doi.org/10.1002/ese3.960>

247. Churchill S.W., Usagi R. (1972). A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. AIChE Journal, 18(6), 1121–1128.
<https://doi.org/10.1002/aic.690180612>

248. Mizushima J., Takahashi S. (2015). Numerical analysis of coolant flow in marine diesel engines. Journal of Marine Science and Technology, 20(4), 705–717.
<https://doi.org/10.1007/s00773-015-0332-7>

249. Kim K., Lee S. (2018). Development of advanced cooling strategies for marine engines. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(1), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.12.004>

250. Wang Y., Zhang X. (2019). Influence of cooling water temperature on marine diesel engine performance. *Ocean Engineering*, 186, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106130>

251. CHINO DB1000 Series. Digital indicating controller. Performance Specification / CHINO Corporation. - Inst. No. INE- 893. - Japan. - 2012. <http://www.chino.com.jp>

ДОДАТОК А

Акти та довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«MARIN TEX SERVICE»



ЄДРПОУ 41738536, адреса: 65091, місто Одеса, вулиця Комітетська, будинок 14, офіс 210
 Email: marin.servis.2017@gmail.com Телефон: +380935665375

Акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження на тему:
«Розробка методів оперативної оцінки безпеки операцій динамічного
позиціонування суден»

У дисертаційному дослідженні **Богаценка Євгена Анатолійовича** запропоновано комплексну методику для забезпечення безпеки морських операцій у режимах динамічного позиціонування (DP). У рамках дослідження реалізовано інноваційні рішення для побудови динамічних моделей оцінки ризиків (DPRA), які об'єднують технічні події (збої рушіїв, втрати позиції, деградація систем живлення) та поведінкові реакції операторів (DPO), з урахуванням сценарного прогнозування.

Розроблені методики були успішно впроваджені у практичну діяльність нашого підприємства, аналіз аварій та оптимізацію технічних рішень, що стосуються стабільності роботи суден-буксирів (в тому числі з DP-системами), особливо під час виконання портових операцій, взаємодії з суднами та іншими об'єктами буксирування. Впровадження забезпечило:

- покращення інтерпретації ризиків у складних гідрометеоумовах;
- підвищення точності реагування при перевантаженнях систем живлення;
- оптимізацію параметрів головного двигуна шляхом впровадження температурного моделювання.

Використання запропонованих підходів дозволило суттєво підвищити технічну надійність, безпеку й адаптивність судових операцій, а також відповідність рекомендаціям ІМСА/ІМО щодо ризик-аналізу в портових операціях.

З повагою
 Директор



Олексій БУЛАТОВ



QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
 IS CERTIFIED IN COMPLIANCE
 WITH DCTU ISO 9001:2015
 by Shipping Register of Ukraine

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД,
ТЕРИТОРІЙ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ
УКРАЇНИ

**КАЗЕННЕ ПІДПРИЄМСТВО
«МОРСЬКА ПОШУКОВО-
РЯТУВАЛЬНА СЛУЖБА»**

Україна, 65114 м. Одеса,
вул. Люстдорфська дорога, 140 а
Тел.: +380 48 785 07 17
Факс: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

MINISTRY FOR COMMUNITIES,
TERRITORIES AND INFRASTRUCTURE
DEVELOPMENT OF UKRAINE

**STATE ENTERPRISE
"MARITIME SEARCH AND
RESCUE SERVICE"**

140 a, Lustdorfska Doroha Str., Odesa
65114, Ukraine
Tel: +380 48 785 07 17
Fax: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи

У дисертаційному дослідженні **Богаченка Євгена Анатолійовича** на тему «Розробка методів оперативної оцінки безпеки операцій динамічного позиціонування суден» було запропоновано та реалізовано інноваційні методи для динамічної оцінки ризиків у режимах DP (Dynamic Positioning), що поєднують технічні сигнали від суднового обладнання з поведінковими реакціями операторів (DPO).

Дослідження охоплює як математичні моделі ризик-аналізу (дерева відмов, сценарні мережі), так і інструменти практичного використання: DSS, тренажерні сценарії, моделі людського фактору SPAR-H, ATHEANA, а також термомодельовання режимів роботи ГД. Інтеграція даних з IMCA, ASOG та тренажерів дозволила досягти високої точності оцінки ризиків у реальному часі.

Результати дослідження були успішно впроваджені у практику технічного аналізу ризиків при підготовці пошукових операцій на об'єктах нашого підприємства, зокрема при оцінці сценаріїв втрати перевантаження систем живлення та взаємодії з MODU. Впровадження дозволило:

- підвищити рівень передбачення критичних ситуацій;
- покращити реакцію судноводіїв завдяки DSS-рекомендаціям;
- зменшити ризик помилкових рішень в умовах багатфакторного навантаження.

Ці рішення мають високу практичну цінність для безпеки морських операцій, економічної ефективності та відповідності стандартам IMO та IMCA.

Т.в.о директора

Деметрій БУРЛАЧЕНКО
+38 (048) 774-42-15



Руслан МІКРУХ



ДОДАТОК Б

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Богаченко, Я., Ворохобін, І., Бурмака, І., Мельник, О., Онищенко, О. (2024). Системи динамічного позиціонування: Математичне моделювання та алгоритми управління. *Судноводіння*, 36, 20-29. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.20-29>

2. Рябцов, О. В., Богаченко, Є. А., Мельник, О. М., Налева, Г. В., Онищенко, О. А. (2025). Адаптація регуляторів температури головного двигуна для підвищення надійності експлуатації суден у режимі динамічного позиціонування. *Наука і техніка сьогодні*, (4)45, 1532–1551. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4\(45\)-1532-1551](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-4(45)-1532-1551)

3. Богаченко, Є., Ворохобін, І. (2025). Використання параболічного регулятора для підвищення маневреності та позиціонування самохідних бурових платформ. *Судноводіння*, 37, 10-18. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.37.2025.10-18>

Статті у наукових журналах, які індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science:

4. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. D. (2021). Monitoring and identification of DP operators behavioural traits and common errors during simulator training. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(2), 337–341. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.09>

5. Pipchenko, O., Konon, N., & Bogachenko, Y. (2023). Mathematical modelling of "ASD tug - marine vessel" interaction considering tug's

maneuverability and stability limitations. *Journal of Maritime Research*, 20(2), 117–124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8370780>

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Bogachenko, Y., & Pipchenko, O. (2021). Probabilistic risk assessment in dynamic positioning operations. In *Матеріали науково-технічної конференції “Судноводіння, морські перевезення та технології” «Navigation, Shipping and Technology» NST-2021* (18–19 листопада 2021 р., с. 82–85), м. Одеса, Україна.

7. Богаченко, Є. В., Ворохобін, І. І., Онищенко, О. А. (2025). Концепція створення енергоефективної системи динамічного позиціонування спеціалізованого морського судна. *Науковий семінар «Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок»* (20 січня 2025 р.), Військова академія, м. Одеса, Україна.

8. Богаченко, Є. А. (2025). Ймовірнісна оцінка ризиків у динамічному позиціонуванні морських суден. In *Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції European Congress of Scientific Discovery* (28–30 квітня 2025 р., с. 118–121). Barca Academy Publishing.

9. Bogachenko, Y. A. (2025). Adaptive risk management in offshore dynamic positioning. In *Scientific Achievements of Contemporary Society: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference* (1–3 May 2025, London, UK, pp. 171–173). Cognum Publishing House.

10. Богаченко, Є. (2025). Профілактика та ремонт радіонавігаційних систем як основа безпеки динамічного позиціонування суден. In *Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Modern Science, Economy and Digital Innovation"* (7–9 травня 2025 р., Бухарест, Румунія).

11. Bogachenko, Y. (2020). *DP Concept: Principles of Dynamic Positioning*. Odesa: National University “Odesa Maritime Academy.” 154 p. ISBN 978-617-7822-88-1 (монографія)