

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПІПЧЕНКО Олександр Дмитрович**

УДК 656.612.8

**ДИСЕРТАЦІЯ**

Розвиток теорії та практики управління ризиками при  
вирішенні комплексних навігаційних задач

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів  
мають посилання на відповідне джерело.



(підпис)

О. Д. Піпченко

Науковий консультант Цимбал Микола Миколайович,  
доктор технічних наук, професор

**Одеса – 2021**

## АНОТАЦІЯ

*Піпченко О.Д.* Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 – річковий та морський транспорт). – Національний університет "Одеська морська академія", м. Одеса, 2021.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

На основі аналізу сучасних інформаційних джерел, визначено, що у галузі експлуатації морських суден, при дослідженнях і проектуванні сучасних судових систем і комплексів, у перманентному розвитку теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач, сьогодення вимагає вирішення, суто практичних, наукових проблем:

- підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане із гарантуванням безпеки судноплавства;
- витрати і заходи, спрямовані на гарантування безпеки судноплавства, повинні бути настільки малими, наскільки це не тільки теоретично, а й практично обґрунтовано.

На основі аналізу наукової проблеми сформульовано гіпотезу: досягнення комплексної ефективності роботи морських суден із одночасним гарантуванням безпеки судноплавства може бути ефективно вирішено шляхом впровадження у практичну діяльність судоводіння методів кількісної оцінки безпеки.

*Метою* дослідження є підвищення ефективності та безпеки судноплавства при вирішенні комплексних навігаційних задач, яка реалізується шляхом

вдосконалення та впровадження запропонованих теоретичних засад управління ризиками.

*Головні завдання дослідження наступні.*

1. Аналіз наукових досліджень та проблем засобів морського транспорту, спрямований на висвітлення основних факторів, що впливають на безпеку судноплавства в умовах новітніх концепцій та стратегії розвитку судноплавної галузі.

2. Збір статистичних даних про основні помилки у практиці судноводіїв, їх категоризація та аналіз.

3. Дослідження та оптимізація математичних моделей процесів судноводіння, спрямованих на вирішення завдань підвищення точності оцінювання навігаційних даних.

4. Розробка методів кількісного оцінювання безпеки судноплавства.

*Об'єктом* дослідження є процеси безпечної навігації та управління рухом засобів водного транспорту.

*Предметом* дослідження є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних методів управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач судноводіння.

На прикладі організації та планування операцій судна визначені, засновані на запиті практики, основні проблеми і задачі гарантування безпеки та підвищення ефективності роботи морського транспорту.

Доведено, що подальший розвиток ефективного, з позицій комерційної експлуатації, функціонування морських і річкових суден, пов'язаний з гарантуванням безпеки мореплавства, яка досяжна тільки впровадженням інтегрованих методів її кількісного оцінювання.

Показано, що існуючі способи оцінки ризику слабо обґрунтовані і неефективні у режимі операційної підтримки рішень. Встановлено, що вдосконалення існуючих способів оцінки безпеки можливо за рахунок впровадження кількісної оцінки ризиків на основі операційної інформації, що

надходить від вимірювальної системи судна, автоматичної ідентифікаційної системи інших суден і зовнішніх систем управління рухом.

На основі аналізу аварійності морського транспорту та моделювання інцидентів на симуляторах навігаційного містку під час тренування судноводіїв запропоновано класифікацію помилок судноводіїв за результатами небезпечних наближень, зіткнень та посадок суден на міліну, яка відрізняється розробленою структуризацією помилок, що дозволяє проводити декомпозицію причин морських інцидентів.

Визначені основні методологічні основи і принципи аналізу та синтезу процедур і процесів управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач (теоретичні засади, головні принципи і методи), визначена "технологія" наукового дослідження.

Встановлено, що для отримання адекватної моделі руху судна для використання у бортовій системі підтримки прийняття рішень необхідно уточнювати існуючу модель на основі малої вибірки даних та запропоновано методику верифікації математичної моделі плаского руху судна, яка за рахунок форми запису цільових функцій, дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

Вдосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок вільного падіння та інших подібних об'єктів для використання на симуляторах.

Запропоновано використання двоканальної системи стабілізації курсу судна, побудованої на основі штучних нейронних мереж. Встановлено, що пропонована система ефективно компенсує дію вітро-хвильових збурень та зменшує витрати пального у режимах стабілізації курсу. Досліджені процеси управління маневруванням судна на основі систем автоматичного проходження вздовж траєкторії. Проведено порівняння ефективності запропонованих алгоритмів для різних експлуатаційних умов плавання.



На прикладі взаємодії буксир-судно отримано 6 *DoF* математичну модель взаємодії системи суден пов'язаної гнучким тросом, яка відрізняється урахуванням остійності та плавучості суден, натягу тросу, функціонування гвинторульових колонок, що дозволяє створювати симулятори роботи суден з буксирами та оцінювати можливість втрати керованості і остійності буксиру у різних експлуатаційних умовах.

На прикладі судна сейсмічної розвідки з буксированою системою плавучих кабелів великої довжини отримано модель системи «судно – несамохідній буксирований об'єкт» на гнучкому зв'язку, що дозволяє проводити симуляцію проходження небезпечних ділянок, з урахуванням зовнішніх факторів.

На прикладі ситуації розходження судна-цілі з кінцевим буєм сейсмічного кабелю, запропоновано метод зворотного розрахунку розходження суден з урахуванням дрейфу буксированого об'єкту на гнучкому зв'язку.

Запропоновано метод визначення небезпечного зближення суден та маневру останнього моменту, залежно від маневрених характеристик судна та куту перетину курсів, у якому визначення потенціального контакту суден виконується віддаленням цілі від розрахункової точки зіткнення, що дозволяє зменшити кількість можливих небезпечних ситуацій, та у значної мірі уточнити і спростити розрахунки.

Запропоновано категоризацію зон навігаційного ризику та мінімального запасу під кілем, з урахуванням точності картографічної інформації; вдосконалено метод розрахунку безпечної глибини та визначення лімітуючих параметрів при плануванні навігаційного переходу судна, який відрізняється урахуванням комплексу параметрів безпеки.

Сформульовано критерій оцінювання найкоротшої дистанції розходження суден, з урахуванням параметрів судна та куту перетину курсів, що дозволяє аргументовано оцінювати небезпеку зіткнення суден.

На основі отриманих критеріїв оцінки безпеки судна розроблено метод кількісної оцінки ризику навігаційного інциденту з різнорідними вхідними даними, заснований на концепції формальної оцінки безпеки та нечіткій логіці.

Експериментально, та за допомогою методів математичного моделювання, підтверджено, що отримані у дисертації основні наукові результати можуть використатися при розробці алгоритмів та моделей, які є частиною суднових систем підтримки прийняття рішень та навігаційних симуляторів при навчанні, перепідготовці і підвищенні кваліфікації судноводіїв, та осіб, які відповідають за планування роботи флоту, під час розробки проектів експлуатації суден, портів, плануванні рейсу судна та моніторингу безпечного виконання процесів судноводіння.

Основні практичні результати дослідження впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес ЗВО, а також пройшли апробацію на наукових заходах міжнародного і державного рівня.

**Ключові слова:** навігаційна задача, кількісна оцінка ризику, ефективність, система підтримки прийняття рішень, математичне моделювання, нечітка логіка.

## ANNOTATION

*O. D. Pipchenko.* Development of theory and practice for the risk management of complex navigational tasks. – Qualification scientific work as a manuscript. Thesis for the Doctor of Technical Sciences degree on the specialty 05.22.13 – navigation and traffic control (271 – river and maritime transport). – National university “Odessa maritime academy”, Odessa, 2021.

The thesis scientifically establishes and validates a new conceptual solution to the important scientific and technical problem of improving the safety of maritime transport operation, which is achieved by using the first introduced and improved existing methods of risk quantitative assessment and management during complex navigational tasks performance.

The analysis of modern information sources determined that at present in the field of operation of sea-going vessels, given constant development of the theory and practice of risk management in solving complex navigation problems, the research and design of modern vessel systems and units require addressing strictly practical scientific problems:

- improving the complex efficiency of sea-going vessels which shall be closely associated with the safety of navigation;
- the costs and measures aimed at ensuring the safety of navigation shall be as low as theoretically sound and also practically justified.

Based on the scientific problem analysis a hypothesis was formulated: a complex efficiency of sea-going vessels with a simultaneous ensuring the safety of navigation can be effectively achieved by integrating quantitative safety assessment methods into the navigation practice.

*The aim* of this research is to improve the efficiency and safety of navigation for complex navigation tasks, which is accomplished by developing and implementing the proposed risk management theoretical framework.

*The main objectives* of the research are as follows:

1. The analysis of scientific research studies and problems of maritime transport aimed at highlighting the main factors affecting the safety of navigation in the context of the latest concepts and shipping development strategies.

2. The collection, categorization and analysis of statistical data on the common navigators' errors.

3. The research and optimization of mathematical models for navigation processes aimed at accuracy improvement of navigation data estimation.

4. The development of quantitative risk assessment methods for the safety of navigation.

*The object* of the research is the processes of safe navigation and waterborne transport traffic management.

*The subject* of the research is a set of theoretical and methodological, design and applied risk management methods for complex navigational tasks.

Based on the example of the organization and planning of vessel operations and guided by the practice, the main problems and tasks of ensuring the safety and improving the efficiency of maritime transport are identified.

It is proved that the further development of efficient, from the commercial standpoint, operation of maritime and river transport is associated with ensuring the safety of navigation, which is achievable only by introducing integrated quantitative risk assessment methods.

The research demonstrates that existing risk assessment methods are poorly substantiated and ineffective in terms of operational decision support. It is established that the improvement of the existing safety assessment methods is possible through the introduction of quantitative risk assessment based on the operational data from the vessel's measurement system, Automatic Identification System of other vessels and external traffic management systems.

Based on the maritime transport incident rate and incidents reconstruction on navigation bridge simulators during the deck officers training, classification of errors

following the close quarters situations, collisions and groundings is presented. The classification differs by the structuring of errors, which allows decomposing the causes of maritime incidents.

The main methodological frameworks and principles of analysis and synthesis of risk management procedures and processes for performing complex navigational tasks (theoretical foundations, main principles and methods) are determined, and the “technology” of scientific research is defined.

It is established that in order to obtain an adequate vessel motion model for the onboard decision support system it is necessary to refine the existing model based on a small sample of data. A method for verifying the mathematical model of vessel planar motion is proposed, which, due to objective functions form, allows refining mathematical vessel motion models when using a limited sample of sea trials data.

The method of calculating the vessel dynamic stability in real time is improved, which makes it possible to calculate the motion of a partially or fully submerged vessel that allows further developing of the models of free-fall lifeboats and other similar objects for simulator purposes.

A dual-loop course control system on the basis of artificial neural networks is suggested for use. It is established that the proposed system effectively compensates for the effect of wind and wave disturbances and reduces fuel consumption in course stabilization modes. The processes of vessel manoeuvring control based on autopilot track-keeping systems are studied. The effectiveness of the presented algorithms for different operating conditions is compared.

By means of the tow-vessel interaction example, a 6 *DoF* mathematical interaction model of the vessel group connected with a flexible cable is obtained, which is characterized by stability and buoyancy of vessels, cable tension, and the functioning of azimuth thrusters. It makes it possible to develop tug-operations simulators and assess the probability of the loss of steering control and stability of the tug in different operating conditions.

Using the example of a seismic vessel with a towed system of long floating cables the model of a “vessel–non-propelled towed object” system with a flexible connection is obtained, which allows simulating the passage of dangerous areas taking into account external factors.

Using the example of a target vessel passing a tail-buoy attached to a streamer the method for reverse calculation of passing distance is proposed taking into account the drift of the towed object with the flexible connection.

The research proposes a method for determining the closest point of approach and the last moment manoeuvre, depending on the manoeuvring characteristics of the vessel and the crossing angle. It determines the contact probability by distancing the target away from the calculated collision point, which allows reducing the number of possible dangerous situations, and significantly refines and simplifies calculations.

Categorization of navigational risk areas and safe under-keel clearance margin with regard to the accuracy of chart information is presented; the method of calculating the safety depth and determining the limiting parameters for passage planning, which is characterized by taking into account a set of safety parameters, is improved.

A criterion for estimating the closest point of approach with regard to the vessel parameters and the heading crossing angle, which makes it possible to reasonably assess the collision risk, is formulated.

On the basis of the obtained safety assessment criteria a quantitative risk assessment method for a navigation incident with heterogeneous input data, based on the concept of formal safety assessment and fuzzy logic, is developed.

Experimentally and by means of the mathematical modelling methods, it is confirmed that the main scientific results obtained in this thesis can contribute to the development of algorithms and models that make a part of decision support systems and navigation simulators during the training, refresher and updating training of deck officers and personnel responsible for the fleet management, during the development

of vessels and port operation projects, voyage planning, and monitoring the safety of navigation processes.

The main practical results of the study were implemented in the operating activities, in the educational process of higher educational institutions, and also were tested and approved at scientific events on the international and state levels.

**Keywords: navigation problem, quantitative risk assessment, efficiency, decision support system, mathematical modelling, fuzzy logic.**

## СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Pipchenko A. D.** Ship maneuvering with towed seismic equipment mathematical model // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 21. – Одесса: ИздатИнформ, 2012. – С. 178-184.
2. **Пипченко А. Д.** Формальная оценка безопасности при выполнении задач судна // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 23. – Одесса: ИздатИнформ, 2013. – С. 114-121.
3. **Пипченко О. Д.** Моніторинг та ідентифікація помилок під час навчання на навігаційних симуляторах // Збірник наукових праць НУК, №2 2020. – С. 3 – 11. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.2\(480\).1](https://doi.org/10.15589/znp2020.2(480).1).
4. **Пипченко О. Д.** Розробка робастного регулятора курсу судна на базі теорії штучних нейронних мереж // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2013. - №1 – С. 137-142.
5. **Пипченко А. Д.** Анализ аварийности мирового флота 2005-2015 // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 27. – Одесса: ИздатИнформ, 2017. – С. 159-168.
6. **Пипченко А. Д.** Математическое моделирование работы буксира с азимутальными движителями на тресе // Збірник наукових праць НУК, №2 2017. <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2017/2/4.pdf>
7. **Пипченко А. Д.** Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна // Вестник Одесского национального морского университета 2 (51), Одесса: ОНМУ вып. 2(51), 2017. – С. 156-164.
8. **Пипченко А. Д.** Расчет крена судна на циркуляции // Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (16). – Херсон: ХГМА, 2017. – С. 61-67.



9. **Пипченко А. Д.** К вопросу автоматизированного управления судном на траектории / А. Д. Пипченко, В. А. Шевченко // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 19. – Одесса: ИздатИнформ, 2010. – С. 149-155.
10. **Пипченко А. Д.** Проблема выбора трансокеанского маршрута и пути ее дальнейшего исследования / А. Д. Пипченко, В. Г. Алексишин, Д. В. Астайкин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 19. – Одесса: ИздатИнформ, 2010. – С. 143-148.
11. **Пипченко А. Д.** Особенности оценки опасности столкновения на судах сейсмической разведки / А. Д. Пипченко, В. Г. Алексишин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 20. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – С. 3-7.
12. **Пипченко А. Д.** Поиск оптимального закона в задаче автоматизированного регулирования курса судна / А. Д. Пипченко, В. Е. Сикирин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, вып. 20. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – С. 165-174.
13. Шевченко В. А., **Пипченко А. Д.**, Коваленко О. А. Анализ отказов и математическое моделирование ВРШ судов с системами динамического позиционирования // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 25. – Одесса: ИздатИнформ, 2015. – С. 162-171.
14. **Пипченко А. Д.** Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / Пипченко А.Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 27. – Одесса: ИздатИнформ, 2017. – С. 169-176.
15. **Пипченко А. Д.** Математическое моделирование динамики контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / Пипченко А.Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ ОМА, Вып. 28. – Одесса: ИздатИнформ, 2018. – С. 141-151.
16. **Піпченко О. Д.** Моделювання інцидентів при підготовці судноводіїв: зіткнення буксира і балкера / Піпченко О. Д., Пернікоза В.В., Казак Ю.В., Бурчак А.І.// Судноводіння: Зб. наук. трудів НУ ОМА, вип. 29. – Одесса: ИздатИнформ, 2019. – С. 164-172. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.164-172.

17. Буренков О. М. Практичні особливості розрахунку параметрів безпечної глибини при використанні ЕКНІС / Буренков О. М., **Піпченко О. Д.**, Алексішин А. В. // Судноводіння: Зб. наук. трудів НУ ОМА, вип. 30. – Одеса: ІздатІнформ, 2020. – С. 16-26. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.16-26.
18. **Pipchenko O.D.** On the Method of Ship's Transoceanic Route Planning // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 5, No. 3, 2011. – pp. 385-392. (***Web of science***).
19. **Pipchenko O.D.** Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters / **Pipchenko O.D.**, Tsymbal M., Shevchenko V. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 3, 2018. – pp. 567-571. doi:10.12716/1001.12.03.17. (***Web of science***).
20. **Pipchenko O.** Robust Automatic Ship Heading Controller for Various Conditions // O. Pipchenko, V. Shevchenko / Marine Intellectual Technologies - Scientific journal № 4 (42) V.4 2018. – pp. 208-214. (***Web of science***).
21. **Pipchenko O.D.** Features of an Ultra-large Container Ship Mathematical Model Adjustment Based on the Results of Sea Trials / **Pipchenko O.D.**, Tsymbal M., Shevchenko V. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 14, No. 1, doi:10.12716/1001.14.01.20, 2020. – pp. 163-170. (***Web of science***).
22. **Pipchenko O.D.** A Suggestion of an Application of Blended Learning in MET Through a Harmonized STCW Model / **Pipchenko O.D.**, Kovtunen D. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 14, No. 3, doi:10.12716/1001.14.03.04, 2020. – pp. 545-548. (***Web of science***).
23. **Pipchenko O.** Features of ship heading maneuvering in close quarters situation // Slovak international scientific journal: Vol. 1, №41, 2020. – pp. 39 – 46.
24. **Pipchenko A.** Development of Mathematical Algorithms for the Seismic Research Vessel Maneuvering Simulator / **Pipchenko A.**, Tsymbal N. //

Proceedings of the INSLC 17 - International Navigation Simulator Lecturers' Conference, Hochschule Wismar, Rostock – Warnemuende, 2012. – 10 p.

25. **Pipchenko O.** Aspects of maritime resource management training for emergency steering scenarios on azimuth thrusters / O. Pipchenko, V. Shevchenko // ICERS 13, Odessa, 2017. – pp. 16-24.
26. Burenkov O. Monitoring and identification of errors during training on ECDIS simulators / Burenkov O., **Pipchenko O.** // Slovak international scientific journal: Vol. 1, №43, 2020. – pp. 46 – 50.

**ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ  
І ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ  
РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Пипченко А. Д. Повышение надежности работы рулевых машин методами теории отказа-толерантного управления / Пипченко А. Д., Шевченко В. А. // Матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT - 2011)» Херсон, 2011. – С. 268 – 272.
2. Пипченко А. Д. Нечеткая логика и математическое моделирование в задаче оценки ситуации опасного сближения судов // Материалы международной научно-практической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2017», Херсон: ХДМА, 2017. - С. 9 – 12.
3. Пипченко А. Д. Определение условий потери управляемости и опрокидывания буксиров при помощи математического моделирования // Материалы всеукраинской научно-технической конференции «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», Николаев: НУК им. адм. Макарова, 2017. – С. 54-57.
4. Пипченко А. Д. Математическое моделирование плавучести крытой шлюпки на волнении // Материалы научно-технической конференции «Транспортні технології (морський і річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення та автоматизація», Одесса: НУ ОМА, 2017. – С. 51-53.
5. Піпченко О. Д. Моделювання інцидентів при підготовці і перевірці компетентності моряків: ситуація зіткнення буксира «НЕФТЕГАЗ-67» і судна «УАО НАІ» / Перникоза В.В., Казак Ю.В., Бурчак А.І. // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація». 14-15.11.2019. – С. 72 – 75

6. Піпченко О. Д. Візуалізація качки динамічно-позиціонуємої баржі в реальному часі // Матеріали міжнародної научно-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020», Херсон: ХДМА, 2020. – С. 81 – 83.
7. Алексишин В. Г. Математическая статистика и теоретические основы судовождения / В. Г. Алексишин, **А. Д. Піпченко**, А. В. Алексишин. – Одесса: ОНМА, 2011. - 92 с.
8. **Піпченко А. Д.** Обработка и анализ навигационной информации. Курс лекций / Піпченко А. Д., Вагущенко А. Л. – Одесса: ОНМА, 2011. - 92 с.
9. Піпченко О. Д. Комп'ютерна програма «Towing system». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 72915 від 18.07.2017
10. Піпченко О. Д. Комп'ютерна програма «Vessel floatation». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 77874 від 27.03.2018
11. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Планування маршруту за допомогою EKNIC (Passage Planning with ECDIS)». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 93129 від 16.07.2019
12. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Управління баластними операціями (Ballast water management)». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 92505 від 08.10.2019
13. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Radar navigation». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 100228 від 06.10.2020
14. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Mooring system management». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 100229 від 06.10.2020

## ЗМІСТ

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ .....                                                           | 22 |
| ВСТУП.....                                                                                  | 23 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АВАРІЙНОСТІ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ.....                                          | 32 |
| 1.1 Аналіз аварійності та проблеми безпеки судноплавства .....                              | 32 |
| 1.2 Проблема формалізованої оцінки безпеки комплексної навігаційної<br>задачі .....         | 41 |
| 1.2.1 Основні елементи методики формалізованої оцінки безпеки .....                         | 41 |
| 1.2.2 Експертна оцінка у задачах ФОБ.....                                                   | 53 |
| 1.2.3 Фактори, які впливають на виникнення аварійних ситуацій .....                         | 54 |
| 1.3 Аналіз причин навігаційних інцидентів .....                                             | 58 |
| 1.3.1 Визначення найбільш поширених аварій .....                                            | 58 |
| 1.3.2 Аналіз терміну «маневр останнього моменту» .....                                      | 61 |
| 1.3.3 Моніторинг та ідентифікація помилок при навчанні на<br>навігаційних симуляторах ..... | 63 |
| Висновки за розділом 1 .....                                                                | 73 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ І МЕТОДИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ .                                       | 76 |
| 2.1 Обґрунтування вибору теми наукового дослідження .....                                   | 76 |
| 2.2 Методологічні та технологічні аспекти дослідження проблеми....                          | 77 |
| Висновки за розділом 2.....                                                                 | 84 |
| РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СУДНА .....                                          | 85 |
| 3.1 Загальна характеристика і аналіз структури математичної моделі<br>руху судна .....      | 85 |
| 3.1.1 Загальний вид моделі руху судна .....                                                 | 85 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                            | 19  |
| 3.1.2 Системи координат .....                                                              | 87  |
| 3.1.3 Перетворення кутів Ейлера.....                                                       | 89  |
| 3.2 Математичне моделювання плаского руху судна .....                                      | 91  |
| 3.2.1 Загальна форма рівнянь плаского руху судна.....                                      | 91  |
| 3.2.2 Сили і моменти, що впливають на корпус .....                                         | 92  |
| 3.1 Математичне моделювання хитавиці судна.....                                            | 93  |
| 3.2 Уточнення моделі руху судна за результатами випробувань.....                           | 96  |
| 3.2.1 Структура моделі хідкості судна.....                                                 | 97  |
| 3.2.2 Сили і моменти, що впливають на корпус .....                                         | 97  |
| 3.2.3 Моделювання та подальше коригування за результатами<br>випробувань .....             | 98  |
| Висновки за розділом 3 .....                                                               | 107 |
| РОЗДІЛ 4. ДОПОМІЖНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ .....                                                 | 109 |
| 4.1 Моделювання остійності у реальному часі на хвилюванні .....                            | 109 |
| 4.2 Урахування крену судна у моделях плаского руху .....                                   | 117 |
| 4.3 Математичне моделювання систем управління судном на траєкторії<br>.....                | 124 |
| 4.3.1 Загальні положення керування маневром судна на заданій<br>траєкторії .....           | 124 |
| 4.3.2 Робастне управління курсом під час маневрування судна на<br>заданій траєкторії ..... | 127 |
| 4.3.3 Контроль позиції судна по заданій прямолінійної траєкторії...                        | 138 |
| 4.3.4 Контроль повороту під час маневрування судна на заданій<br>траєкторії .....          | 146 |
| 4.3.5 Аналіз роботи САРТ з різними контролерами курсу.....                                 | 152 |
| Висновки за розділом 4 .....                                                               | 154 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 5. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ .....                                               | 156 |
| 5.1 Особливості застосування методів об'єктно орієнтованого програмування при розробці навігаційних симуляторів..... | 156 |
| 5.2 Математичне моделювання системи судно-буксир .....                                                               | 159 |
| 5.2.1 Стан проблеми моделювання системи судно-буксир .....                                                           | 159 |
| 5.2.2 Структура математичної моделі буксира .....                                                                    | 162 |
| 5.2.3 Сили опору на корпусі.....                                                                                     | 162 |
| 5.2.4 Сили, що розвиваються азимутальними рушіями .....                                                              | 163 |
| 5.2.5 Урахування остійності буксира .....                                                                            | 164 |
| 5.2.6 Натяг буксирної лінії .....                                                                                    | 166 |
| 5.2.7 Результати моделювання руху буксира.....                                                                       | 167 |
| 5.2.8 Результати моделювання динаміки системи буксир-судно при роботі на тросі.....                                  | 168 |
| 5.3 Математичне моделювання системи судно-гнучке тіло .....                                                          | 169 |
| 5.3.1 Система судно-гнучке тіло на прикладі сейсмічного судна.....                                                   | 169 |
| 5.3.2 Математична модель судна і системи сейсмічних кіс .....                                                        | 171 |
| 5.3.3 Обмеження спрощеної моделі .....                                                                               | 173 |
| 5.3.4 Верифікація моделі .....                                                                                       | 175 |
| 5.1.1 Маневрування в аварійних ситуаціях .....                                                                       | 175 |
| 5.2 Зворотна задача розходження суден обмежених у маневруванні                                                       | 179 |
| 5.2.1 Оцінка небезпеки зіткнення і оцінка небезпеки перетину .....                                                   | 179 |
| 5.2.2 Визначення нового курсу судна-цілі.....                                                                        | 182 |
| Висновки за розділом 5.....                                                                                          | 185 |
| РОЗДІЛ 6. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА НАВІГАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ .....                                                              | 186 |



|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                 | 21  |
| 6.1 Оцінка небезпеки зіткнення чи навалу .....                                  | 186 |
| 6.2 Оцінка небезпеки посадки на мілину .....                                    | 197 |
| 6.2.1 Оцінка безпечної глибини .....                                            | 197 |
| 6.2.2 Розрахунок границь безпечного коридору .....                              | 206 |
| Висновки за розділом 6 .....                                                    | 211 |
| РОЗДІЛ 7. ОЦІНКА НАВІГАЦІЙНИХ РИЗИКІВ .....                                     | 212 |
| 7.1 Ризик-орієнтований підхід до оцінки небезпеки контакту .....                | 212 |
| 7.2 Оцінка навігаційних ризиків на основі неоднорідних параметрів ....<br>..... | 219 |
| 7.3 Оцінка навігаційних ризиків за допомогою нечіткої логіки .....              | 224 |
| Висновки за розділом 7 .....                                                    | 238 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                   | 240 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                 | 244 |
| ДОДАТОК А – РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРТНОГО ОПИТУВАННЯ<br>СУДНОВОДІВ .....               | 270 |
| ДОДАТОК Б – АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ<br>ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....    | 279 |

**ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ**

|         |                                                    |
|---------|----------------------------------------------------|
| ALARP - | настільки низький, наскільки це практично можливо; |
| ASD -   | гвинто-стернова колонка;                           |
| CRA -   | дистанція найкоротшого зближення;                  |
| DTCP -  | дистанція до точки найкоротшого зближення;         |
| DTG -   | дистанція у наступну точку;                        |
| DTP -   | дистанція з попередньої точки;                     |
| HER -   | імовірність помилки людини;                        |
| IMO -   | міжнародна морська організація;                    |
| MDTCP - | мінімальна DTCP;                                   |
| MOM -   | маневр останнього моменту;                         |
| TCRA -  | час до найкоротшого зближення;                     |
| XTD -   | бокове відхилення;                                 |
| ZOC -   | зона достовірності.                                |
| АЧХ -   | амплітудно-частотна характеристика;                |
| ЕКНІС - | електронна картографічна інформаційна система;     |
| САРТ -  | система автоматичного регулювання на траєкторії;   |
| СУБ -   | система управління безпекою;                       |
| ФОБ -   | формалізована оцінка безпеки.                      |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Неухильне зростання світового населення і його потреб ставить перед світовою спільнотою нові споживчі виклики. Саме тому, обсяги перевезень, кількість і тоннаж світового флоту безперервно збільшуються. Крім міжнародної торгівлі стрімко розвивається морський енергетичний сектор - глибоководне буріння, видобуток газу та нафти, створення і використання альтернативних джерел енергії тощо. Інтенсифікація всіх напрямків розвитку людства також зумовлює ускладнення морських операцій, пов'язаних зі збільшенням типів, кількості і розмірів суден, що суттєво збільшує ризики, які відносяться до проведення цих операцій. Статистика аварійності світового флоту показує позитивну тенденцію у бік загального зменшення втрат: факторами зменшення аварійності на суднах з'явилися технологічний прогрес, що спостерігається у всіх областях морської індустрії і регулятивні заходи Міжнародної морської організації (ІМО). Сумісна дія цих факторів вплинула на поліпшення загальної культури безпеки у судноплавних компаніях і, зокрема, на якість підготовки всіх морських фахівців.

Основною метою у області політики безпеки, сучасні судноплавні компанії визначають нульову кількість аварійних випадків ("*Goal Zero*") і все більша увага ними приділяється не тільки до підвищення комерційної складової загальної ефективності роботи флоту, а й загальної безпеці судноплавства. Але, як тільки постає практично значуще питання про необхідність підвищення комерційної ефективності функціонування флоту, виникає *протиріччя* між дотриманням відповідного рівня безпеки і необхідністю отримання прибутку. Слід відзначити, що, згідно даних Європейської асоціації з морської безпеки, у період з 2011 до 2018 року включно, основними причинами майже 66 % морських інцидентів стали неправильні дії персоналу, а половина від загальної кількості аварій припала на навігаційні інциденти - зіткнення та посадки на мілину.

Таким чином, можна визначити, що актуальність роботи полягає у тому, що у галузі експлуатації морських суден, при дослідженнях і проектуванні сучасних

суднових систем і комплексів, у перманентному розвитку теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач, сьогодення вимагає вирішення, суто практичних, наукових проблем:

- підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане з гарантуванням безпеки судноплавства;
- витрати і заходи, спрямовані на гарантування безпеки судноплавства, повинні бути настільки малими, наскільки це не тільки теоретично, а й практично обґрунтовано.

Гіпотезою дослідження є теза: досягнення комплексної ефективності роботи морських суден із одночасним гарантуванням безпеки судноплавства може бути ефективно вирішено шляхом впровадження у практичну діяльність судноводіння методів кількісної оцінки безпеки.

Методологічною основою дослідження є концепція *ІМО* "Формалізованої оцінки безпеки". Для визначених проблем управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач, у дисертації: *а)* наведена і проаналізована статистика аварійності світового флоту за останні роки та ідентифіковані основні причини навігаційних аварій; *б)* уточнена та розширена існуюча термінологія у теорії управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач.

У дослідженні виявлені найважливіші проблеми, що потребують вирішення та урахування сучасній морській індустрії, а саме:

- підвищення автоматизації процесів судноводіння, яке пов'язане з впровадженням у навігацію електронних картографічних навігаційно-інформаційних систем (ЕКНІС) та відмовою від паперових карт;
- значне, непропорційне розмірам сучасних портів, укрупнення флоту, у особливості контейнеровозів;
- загальне зниження кваліфікації командного складу та світові тенденції до зменшення екіпажів суден.

Відзначимо, що гарантування безпеки виконання навігаційних задач є комплексом дій, направлених на зниження ризиків пов'язаних з їх виконанням.

Саме для цього у роботі вирішується низка наукових завдань, зокрема:

- оцінювання навігаційної задачі та ідентифікація небезпеки, її планування та імплементація методів зниження ризиків;
- виконання навігаційних задач згідно плану, моніторинг та корегування їх у залежності від існуючих ризиків та показників ефективності виконання плану;
- удосконалення і розробка принципів розрахунку "безпечної глибини" з урахуванням характеристик зон ризику, змінних умов мореплавання і точності картографічної інформації;
- формулювання методу розрахунку операційного ризику навігаційного інциденту;
- розрахункове, модельне (імітаційне) доведення отриманих результатів на конкретних прикладах управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач.

У роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки судноплавства засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих, і удосконаленні існуючих, методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018 року) і виконане відповідно до положень Морської доктрини України на період до 2035 року (постанова № 1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, № 1108).

Дисертаційна робота виконана у рамках планових наукових досліджень, зокрема, держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) Херсонської державної морської академії, у яких здобувач є автором окремих розділів:

- ДР № 0117U002176 "Створення високоточних інтелектуальних систем управління рухом морських суден військового і цивільного призначення" (2017-2018 р.р.);

– ДР № 0119U100948 "Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден" (2019-2020 р.р.).

**Мета і завдання дослідження.**

**Метою** дослідження є підвищення ефективності та безпеки судноплавства при вирішенні комплексних навігаційних задач, яке реалізується шляхом вдосконалення та впровадження запропонованих теоретичних засад управління ризиками.

Головні завдання дослідження наступні.

1. Аналіз наукових досліджень та проблем морського транспорту, спрямований на висвітлення основних факторів, що впливають на безпеку судноплавства в умовах новітніх концепцій та стратегії розвитку судноплавної галузі.

2. Збір статистичних даних про основні помилки у практиці судноводіїв, їх категоризація та аналіз.

3. Дослідження та оптимізація математичних моделей процесів судноводіння, спрямованих на вирішення завдань підвищення точності оцінювання навігаційних даних.

4. Розробка методів кількісного оцінювання безпеки судноплавства.

**Об'єктом дослідження** є процеси безпечної навігації та управління рухом засобів водного транспорту.

**Предметом дослідження** є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних методів управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач судноводіння.

**Методи дослідження.** У роботі поєднуються теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з абсолютно новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося нераціональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок удосконалені розрахункові методи і алгоритми, що їх реалізують.

Експериментальні методи (тренажери, судна) використані для верифікації математичних моделей, що дозволило максимально наблизити дослідження до вирішення практичних завдань і що підтверджено відповідними актами використання результатів. Дані, отримані у ході експериментальних досліджень і отримані теоретичні результати зіставлені і добре корелюються. Зіставлення підтверджує достовірність отриманих наукових результатів, що одержані за допомогою використаних і запропонованих здобувачем методів, алгоритмів та моделей.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної наукової проблеми підвищення безпечної експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

Наукова цінність дослідження визначається вирішенням основних наукових завдань. Зокрема, здобувачем особисто отримані **нові наукові результати**.

1. Уперше сформульовано критерій оцінювання найкоротшої дистанції розходження суден, *якій відрізняється* урахуванням параметрів судна та куту перетину курсів, *що дозволяє* аргументовано оцінювати небезпеку зіткнення суден.

2. Уперше запропоновано алгоритм розходження судна-цілі з кінцевим буєм сейсмічного кабелю, *який відрізняється* використанням методу зворотного розрахунку розходження суден та урахуванням дрейфу кабелю, *що може використатися* у навігаційних системах підтримки прийняття рішень.

3. Уперше запропоновано категоризацію зон навігаційного ризику та методику визначення запасу під кілем, *яка відрізняється* урахуванням точності картографічної інформації, *що дозволяє* визначити критерії оцінки небезпечності запланованого маршруту судна.

4. Уперше запропоновано метод визначення небезпечного зближення суден та маневру останнього моменту, залежно від маневрених характеристик судна та

куту перетину курсів, який відрізняється тим, що визначення потенційного контакту суден виконується віддаленням цілі від розрахункової точки зіткнення, що дозволяє зменшити кількість можливих небезпечних ситуацій, та у значній мірі уточнити і спростити розрахунки.

5. Уперше запропоновано методику кількісної оцінки ризику навігаційного інциденту, яка заснована на концепції формальної оцінки безпеки та нечіткій логіці і відрізняється структурою системи нечіткої логіки, методами нормування вхідних параметрів та обробки правил, що дозволяє отримати оцінки навігаційної ситуації для суден з різноманітними розмірами та маневровими характеристиками.

6. Удосконалено алгоритм функціонування контролеру курсу судна, який відрізняється використанням запропонованого адаптивного принципу навчання нейронних мереж, що дозволяє отримати робастні властивості системи управління курсом судна.

7. Удосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок вільного падіння та інших подібних об'єктів для використання на симуляторах.

8. Удосконалено метод розрахунку безпечної глибини та визначення лімітуючих параметрів при плануванні навігаційного переходу судна, який відрізняється урахуванням комплексу параметрів безпеки, у тому числі радіусу повороту, границь безпечної зони та поправок на крен, диферент, щільність води, просідання, точність картографічної інформації та інших чинників, що дозволяє об'єктивно і з більшою точністю оцінити запланований маршрут судна.

9. Отримала подальший розвиток класифікація помилок судноводіїв за результатами небезпечних наближень, зіткнень та посадок суден на міліну, яка відрізняється розробленою структуризацією помилок, що дозволяє проводити декомпозицію причин морських інцидентів.

10. Отримала подальший розвиток методика верифікації математичної моделі плаского руху судна, яка відрізняється формою запису цільових функцій,



що дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

11. Отримала подальший розвиток 6 *DoF* математична модель взаємодії системи буксир-судно пов'язаної тросом, яка відрізняється урахуванням остійності та плавучості суден, натягу тросу, функціонування гвинто-рульових колонок, що дозволяє створювати симулятори роботи суден з буксирами та оцінювати можливість втрати керованості і остійності буксиру у різних експлуатаційних умовах.

12. Отримала подальший розвиток математична модель сейсмічного судна з буксированою системою плавучих кабелів великої довжини, яка відрізняється урахуванням динаміки руху гнучкого кабелю, що дозволяє проводити симуляцію проходження небезпечних ділянок.

**Практична цінність дослідження** полягає у тому, що отримані у дисертації основні результати можуть використатися при навчанні, перепідготовці і підвищенні кваліфікації судноводіїв, та осіб, які відповідають за планування роботи флоту, під час розробки проектів експлуатації суден, портів, плануванні рейсу судна та моніторингу безпечного виконання процесів судноводіння, а також при розробці алгоритмів та моделей, які є частиною судових систем підтримки прийняття рішень та навігаційних симуляторів.

**Практичні результати** дисертаційного дослідження застосовуються під час навчання курсантів та фахівців морського флоту, при підвищенні кваліфікації, зокрема у програмі імітаційного моделювання остійності суден "*Vessel floatation*" (авторське свідоцтво № 77874 від 27.03.2018) та у програмі розрахунку параметрів безпеки маршруту для ЕКНІС (акт від 04.06.2020 р.). Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені у виробничу діяльність судноплавної компанії "*Mediterranean Shipping Services*" (акт від 03.06.2020 р.). Матеріали дисертації використовуються у наукових дослідженнях (акт від 03.06.2020 р.) та навчальному процесі (акт від 03.06.2020) Херсонської державної морської академії (акт від 03.06.2020 р.), зокрема - комп'ютерна програма "*Towing System*" (авторське свідоцтво №72915 від 18.07.2017); у

навчальному процесі під час викладання спеціальних дисциплін на кафедрах НУ "ОМА" (акт від 04.06.2020 р.), у навчальному процесі ІПО «Одеський морський тренажерний центр» (акт від 10.06.2020), а також під час спеціальної підготовки судноводіїв (Казахстанська морська академія, акт від 02.06.2020).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційну роботу виконано здобувачем самостійно: проведено інформаційний пошук за темою дисертації та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки та ефективності судноводіння, здійснено розробку методологічного забезпечення, отримано рішення всіх задекларованих складових задач і їх синтезом досягнуто рішення комплексної задачі дисертації, формалізовані алгоритми та розроблено програмне забезпечення; результати роботи впроваджено у виробничий та навчальний процеси. При практичній реалізації запропонованих рішень, здобувачем, без співавторів, визначені рекомендації до розробки тренажерного обладнання для підготовки судноводіїв; рекомендації з удосконалення навчального процесу, наведені перспективи розвитку систем підтримки прийняття рішень під час виконання навігаційних задач.

**У опублікованих у співавторстві** наукових роботах, у дисертації використані тільки ті положення і результати, які належать авторові особисто, що наведено у переліку публікацій (до кожної публікації у співавторстві).

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідались, обговорювались, відображені і були схвалені у наступних наукових заходах: 10<sup>th</sup> *International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Gdynia, Poland, 2011; *INSLC 17 - International Navigation Simulator Lecturers' Conference*, Hochschule Wismar, Rostock – Warnemuende, 2012; 13<sup>th</sup> *International Conference on Engine Room Simulators*, Odessa, NU "OMA", September 20-21, 2017; 13<sup>th</sup> *International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Gdynia, Poland, 2019; міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT - 2011)» Херсон, 2011; міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2017»,

Херсон, 2017; всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова, 2017; науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський і річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення та автоматизація», Одеса: НУ ОМА, 2017; науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація». 14-15.11.2019; міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020», Херсон: ХДМА, 2020.

**Публікації.** За результатами дослідження опубліковано 34 наукові праці, (з них 14 – одноосібні). Зокрема, 26 публікацій у наукових профільних виданнях (з них 5 публікацій індексуються у базах даних *Scopus* і *Web of Science*), 2 навчально-наукових посібника, 10 доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 3 публікації, що індексуються у базі даних *Scopus*).

**Обсяг і структура роботи.** Дисертація складається з анотацій, переліку умовних скорочень, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 286 сторінок, де, крім основного тексту, містяться 126 рисунків, 22 таблиці. Список використаних джерел містить 290 найменувань.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АВАРІЙНОСТІ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

### *1.1 Аналіз аварійності та проблеми безпеки судноплавства*

Протягом останнього десятиліття обсяги перевезень, кількість і тоннаж світового флоту продовжували збільшуватися. Крім міжнародної торгівлі також стрімко розвивався морський енергетичний сектор, як в області розвідки, глибоководного буріння, видобутку газу та нафти, так і побудови альтернативних джерел енергії таких як вітрові генератори.

Інтенсифікація людської активності у морі та ускладнення операцій, пов'язане зі збільшенням кількості і розмірів суден, ведуть до відповідного збільшення ризиків, що відносяться до цих операцій.

Незважаючи на це, статистика аварійності світового флоту демонструє позитивну тенденцію в бік загального зменшення втрат.

Факторами, які впливають на зменшення аварійності, стали, як технологічний прогрес, що спостерігається у всіх областях морської індустрії так і регулятивні заходи ІМО (Міжнародної Морської Організації), які в останні десятиліття в значній мірі вплинули як на якість підготовки фахівців, так і на поліпшення культури безпеки в судноплавних компаніях загалом.

Однак неухильне зростання світового населення та його потреб, ставить перед світовою спільнотою нові виклики. Сучасні судноплавні компанії в області політики безпеки основною метою визначають «Goal Zero», тобто нульову кількість аварійних випадків. До того ж, все більше уваги приділяється підвищенню ефективності роботи флоту. Звісно, як тільки стає питання про підвищення ефективності, виникає конфлікт, пов'язаний з дотриманням відповідного рівня безпеки.

З метою розробки ефективних заходів підвищення і контролю безпеки на флоті, необхідно розуміти основні закономірності виникнення аварійних ситуацій.

Встановлювати і вивчати ці закономірності нам дозволяє статистика аварійності.

На сьогоднішній день основний обсяг інформації про аварійність суден світового флоту доступний у вигляді електронних публікацій на веб-сторінках відповідних організацій.

Так, статистичні дані щодо територіальних вод і суден надають Австралія [15], Японія [252], Великобританія [140], Норвегія [150], Данія [195], Канада [200] та інші.

Дані для європейських вод можна знайти на сторінці EMSA (European Maritime Safety Agency) [58, 59, 57].

Статистичні дані щодо світового флоту надаються незалежними експертами та страховими компаніями [6, 7, 10].

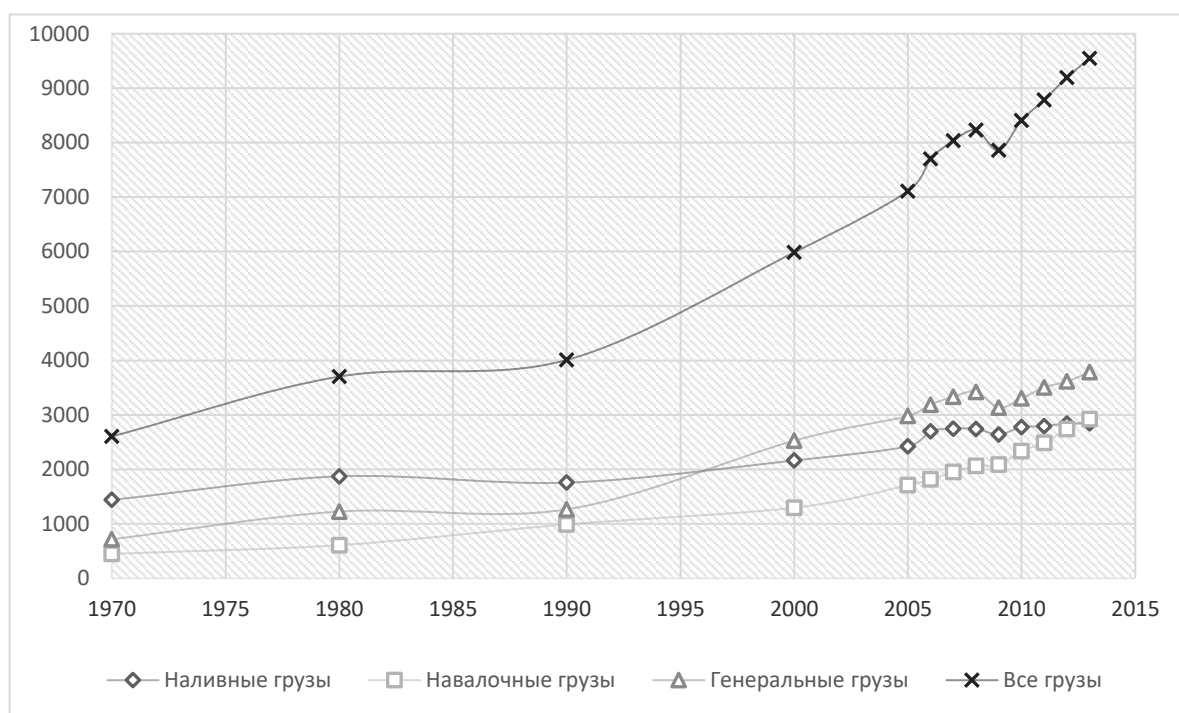


Рис. 1.1. Міжнародні морські перевезення, млн тон

Щоб адекватно оцінити аварійність світового флоту в першу чергу важливо визначити динаміку зміни кількості флоту та його тоннажу, а також інтенсивність судноплавства. Це пов'язано з тим, що найбільш коректно оцінювати зміни в аварійності флоту слід за допомогою відносних величин. Наприклад, за кількістю аварій відносно кількості та типів суден.

Згідно з даними UNCTAD [170] обсяги перевезень морем з 1970 по 2013 рр. виросли майже в 3,7 рази з 2 605 млн тонн до 9548 млн тонн (рис. 1.1).

Найбільш повну інформацію про зміни у складі та кількості світового флоту можна отримати зі звітів EQUASIS [198].

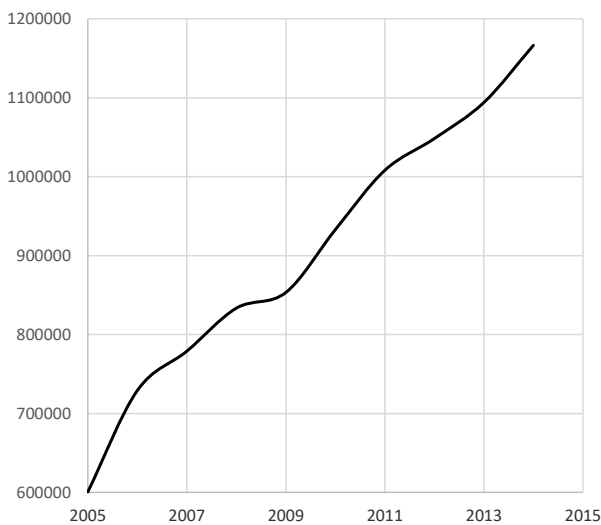


Рис. 1.2. Тоннаж світового флоту, тис

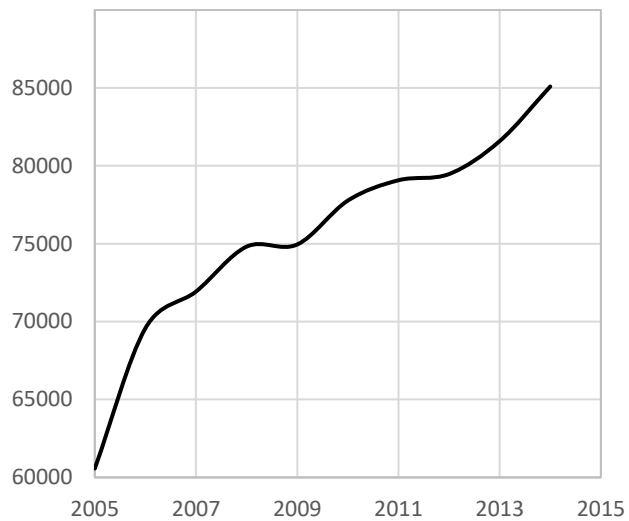


Рис. 1.3. Кількість суден світового флоту

Так, за графіками на рисунках 1.2 і 1.3 видно, що тоннаж світового флоту за останнє десятиліття зріс практично в два рази, а кількість суден – на 40%.

Судна малого і середнього розмірів (до 25 000 рт) кількісно переважають і складають 81% флоту. При цьому малі судна (36%) складають тільки 1% від загального тоннажу флоту.

Буксири (19,6%), універсальні судна (19,1%), наливні танкери (14,5%) і балкери (12,9%) – найбільш поширені категорії суден, більшість з яких малого і середнього розмірів.

Серед великотоннажних суден переважають балкери (30,7%), танкери (29,5%) і контейнеровози (22,9%). При цьому, великотоннажні судна складають приблизно 80% від світового тоннажу. Також спостерігається стабільна тенденція укрупнення флоту.

На рисунках 1.4 і 1.5 відображено розподіл світового флоту за типами суден. Можна відзначити зменшення частки універсальних суховантажних суден. При цьому буксирний флот збільшився в півтора рази, а офшорний – в два рази.

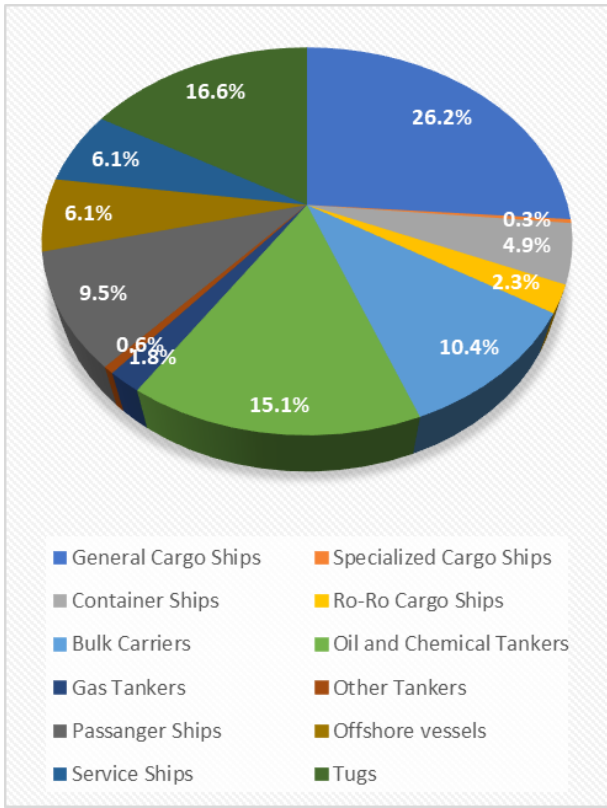


Рис. 1.4. Розподіл суден, 2005

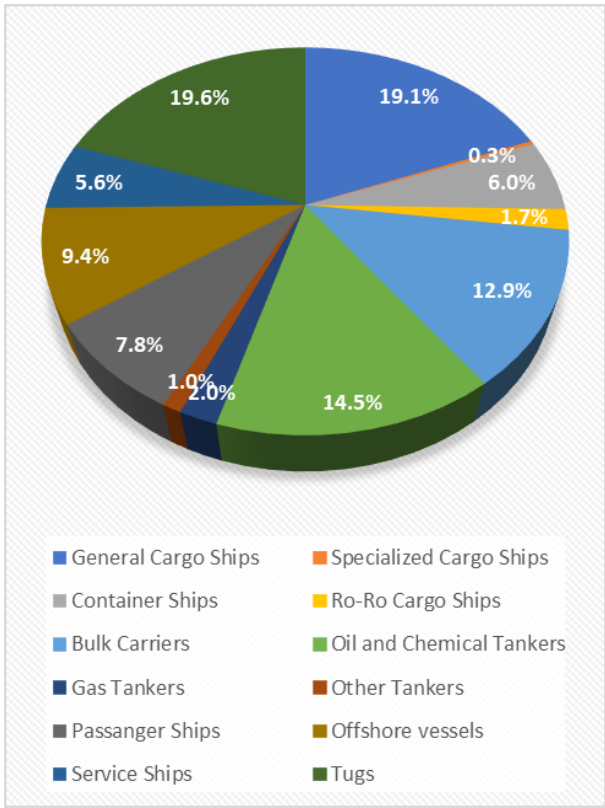


Рис. 1.5. Розподіл суден, 2014

За даними Allianz Global Corporate & Specialty [6] з 2006 по 2015 рр. світовий флот втратив 1231 судно, що становить 1,4% від загальної кількості. Варто зазначити, що відповідно до моделі трикутника Хайнріха, приблизно на 600 нещасних випадків (near miss) припадає одна дрібна аварія, а на 400 дрібних аварій – одна велика [28]. Таким чином, можна судити про масштаби аварійності та інцидентів загалом.

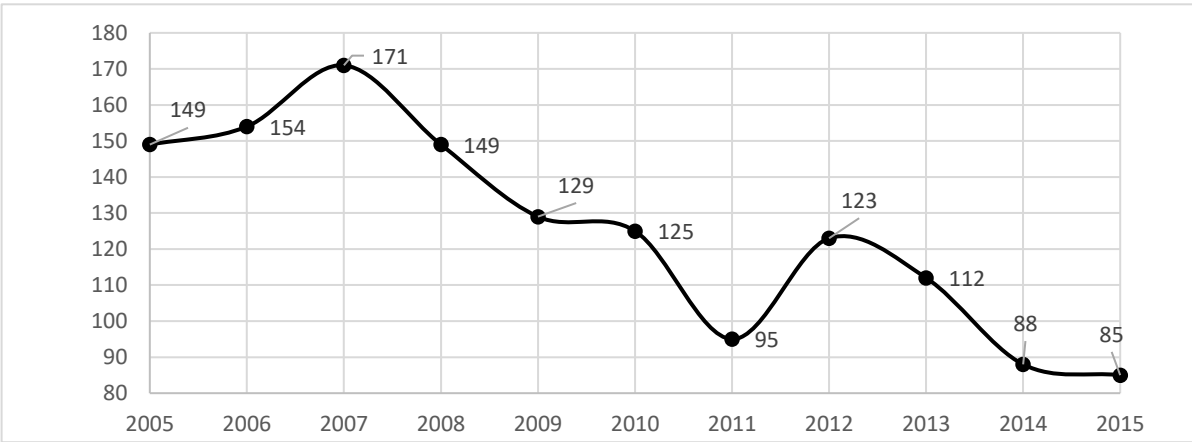


Рис. 1.6. Втрати суден світового флоту

Спостерігається загальна тенденція зменшення аварійності, як за абсолютними, так і за відносними показниками. Якщо в 2005 році втрати суден складали 0,25% від світового флоту, то в 2015 – 0,1%.

З таблиці розподілу втрат суден за типами (табл. 1.1) видно, що на першому місці за абсолютною кількістю аварій знаходяться універсальні суховантажні судна, а на другому – рибпромислові. Це судна, як правило малого тоннажу, та які дуже часто представляють частину субстандартного судноплавства.

*Таблиця 1.1. Розподіл втрат суден за типами*

| Тип                        | 2005       | 2006       | 2007       | 2008       | 2009       | 2010       | 2011      | 2012       | 2013       | 2014      | 2015      | Усього      |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------|
| Суховантажні               | 56         | 61         | 70         | 58         | 51         | 60         | 37        | 61         | 41         | 31        | 36        | 562         |
| Контейнеровози             | 5          | 4          | 3          | 2          | 4          | 5          | 3         | 6          | 4          | 4         | 5         | 45          |
| Ро-ро                      | 10         | 10         | 5          | 8          | 6          | 1          | 3         | 4          | 2          | 5         | 4         | 58          |
| Балкери                    | 8          | 8          | 12         | 8          | 10         | 11         | 14        | 9          | 15         | 4         | 6         | 105         |
| Танкери                    | 2          | 2          | 1          | 3          | 2          | 3          | 3         | 1          |            | 1         |           | 18          |
| Хімовози /<br>продуктовози | 10         | 11         | 6          | 7          | 9          | 5          | 2         | 8          | 10         | 2         | 2         | 72          |
| LPG / LNP                  |            |            |            | 1          |            | 1          | 1         | 1          |            |           |           | 4           |
| Пасажирські                | 12         | 12         | 8          | 4          | 5          | 3          | 7         | 7          | 8          | 10        | 4         | 80          |
| Офшорні                    | 3          | 3          | 5          | 1          | 3          | 2          | 2         | 3          | 2          | 3         | 2         | 29          |
| Буксири                    | 8          | 7          | 11         | 7          | 5          | 7          | 2         | 6          | 7          | 7         | 7         | 74          |
| Днопоглиблювальні          | 2          | 3          | 2          | 5          | 2          | 2          | 2         | 1          | 1          |           |           | 20          |
| Рибпромислові              | 23         | 23         | 34         | 36         | 29         | 21         | 14        | 12         | 13         | 15        | 16        | 236         |
| Баржі                      | 7          | 6          | 6          | 3          |            | 1          |           |            | 3          | 1         |           | 27          |
| Інші                       | 2          | 3          | 7          | 5          | 5          | 3          | 5         | 3          | 6          | 4         | 2         | 45          |
| Невідомо                   | 1          | 1          | 1          | 1          |            |            |           |            | 1          |           |           | 5           |
| <b>Усього</b>              | <b>149</b> | <b>154</b> | <b>171</b> | <b>149</b> | <b>131</b> | <b>125</b> | <b>95</b> | <b>122</b> | <b>113</b> | <b>87</b> | <b>84</b> | <b>1380</b> |



Для більш коректної оцінки аварійності за типами суден, треба знати відносне число аварій. Результатом перегрупування даних EQUASIS [198] і AGCS [6, 7], став рис. 1.7.

EQUASIS не веде статистику рибпромислових суден, тому з даного розрахунку вони були виключені, хоча за кількістю втрат їх частка є однією з найбільших.

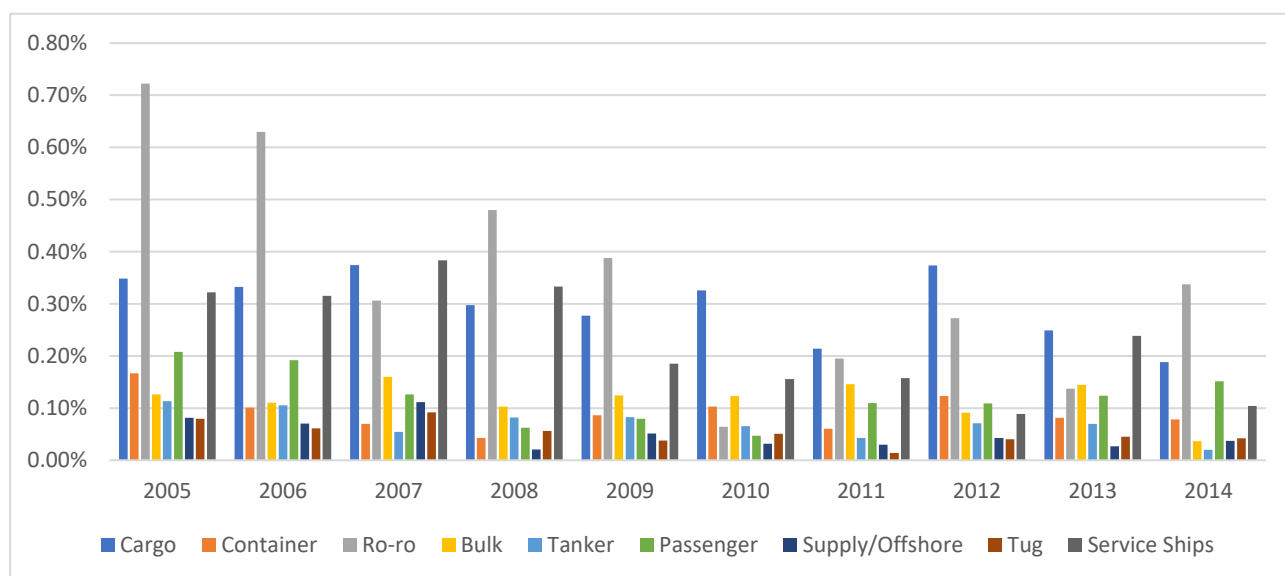


Рис. 1.7. Відносні втрати суден світового флоту

Таблиця 1.2. Розподіл відносних втрат суден за типами 2005-2014

| Ро-ро | Сухо-вантажні | Тех. флот | Балкери | Пасажири | Контейнеровози | Танкери | Офшор | Буксири |
|-------|---------------|-----------|---------|----------|----------------|---------|-------|---------|
| 0.35% | 0.30%         | 0.23%     | 0.12%   | 0.12%    | 0.09%          | 0.07%   | 0.05% | 0.05%   |

Серед усіх інших на першому місці за втратами – ро-ро: в середньому за 2005-2014 рр. – 0,35% від загальної кількості суден цього типу. Далі – суховантажі (0,3%). Найменше втрат серед буксирів і офшорних суден (0,05%).

Причини втрат суден розподілилися наступним чином: на першому місці – затоплення (50%), потім – посадка на мілину (20%), пожежа (10%) та зіткнення (7%).

Найбільш аварійними регіонами (рис.1.8) є Південно-Східна Азія (20%) та район Східного Середземномор'я і Чорного моря (13%).

Таблиця 1.3. Розподіл втрат суден за видами аварій

| Вид аварії          | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Усього |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Затоплення          | 64   | 69   | 73   | 61   | 64   | 45   | 55   | 70   | 50   | 63   | 614    |
| Посадка на мілину   | 29   | 35   | 34   | 23   | 23   | 28   | 26   | 21   | 18   | 12   | 249    |
| Пожежа/вибух        | 19   | 18   | 16   | 14   | 11   | 8    | 13   | 15   | 6    | 3    | 123    |
| Зіткнення           | 23   | 17   | 12   | 13   | 10   | 3    | 5    | 2    | 2    | 3    | 90     |
| Відмова механізмів  | 11   | 14   | 8    | 7    | 4    | 6    | 15   | 2    | 5    | 2    | 74     |
| Пошкодження корпусу | 4    | 11   | 4    | 7    | 4    | 3    | 6    | 1    | 4    | 2    | 46     |
| Інше                | 1    | 3    | 1    | 2    | 6    | 1    | 1    | 1    |      | 2    | 18     |
| Навал               | 2    | 2    | 1    | 1    |      |      | 2    |      | 1    |      | 9      |
| Піратство           |      | 1    |      | 1    | 2    | 1    |      |      |      |      | 5      |
| Пропажа             | 1    | 1    |      |      | 1    |      |      |      |      |      | 3      |
| Усього              | 154  | 171  | 149  | 129  | 125  | 95   | 123  | 112  | 86   | 87   | 1231   |

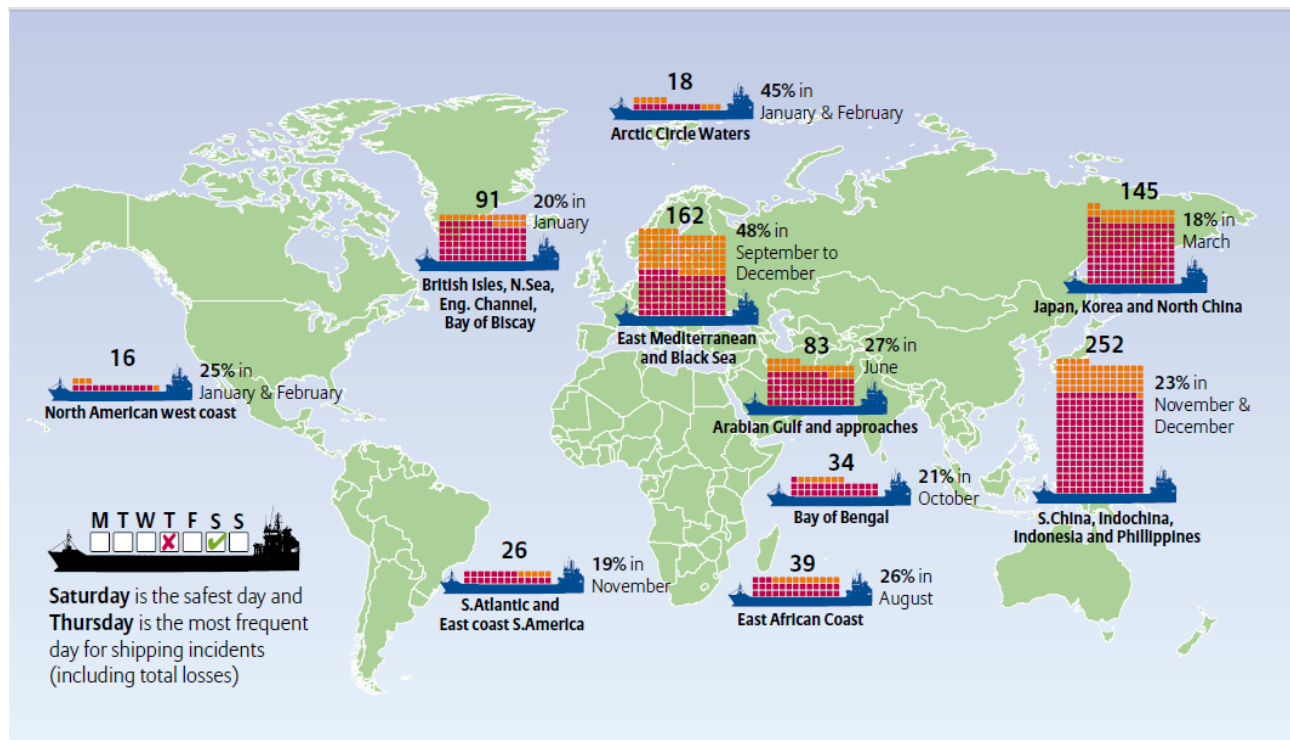


Рис. 1.8. Втрати суден по регіонах, 2006-2015 рр.

З позиції підвищення безпеки найбільш важливою є не стільки статистика аварійності, скільки статистика причин, що призвели до аварій. Корисними в цьому відношенні є звіти, які щорічно видаються Європейським агентством з морської безпеки (EMSA) [57].

Так з 2011 по 2014 рр. зафіксовано 6254 аварії, пов'язаних з суднами під європейськими прапорами або в європейських водах. З них 178 (3%)

класифіковані як дуже серйозні, 1193 (19%) – серйозні, 3662 (58,5%) – менш серйозні, 1221 (19,5%) – морські інциденти.

Згідно з EMSA:

- **дуже серйозна аварія** означає повну втрату судна, смертельний випадок або значне забруднення;
- **серйозна аварія** – це аварія, яка не є дуже серйозною, що стала результатом посадки на мілину, пожежі, зіткнення та інших пошкоджень або забруднення навколишнього середовища;
- **менш серйозна аварія** – це аварія, яка не потрапляє під дві попередні категорії.
- **морський інцидент** – дії або ситуація, які могли б призвести до аварії.

За видами всі аварії розподілилися, як показано на рисунку 1.9. Загалом більшість являють собою аварії навігаційного характеру, серед яких виділяються зіткнення і посадки на мілину. Технічні відмови обладнання, що ведуть до втрати управління та інших аварій, останнім часом також є досить частими [6,174 ].

Основними причинами виникнення аварійних ситуацій згідно з розслідуваннями EMSA є: помилкові дії операторів (67%), відмови обладнання (24%), небезпечні речовини (4%), погодні умови (3%), третя сторона (3%).

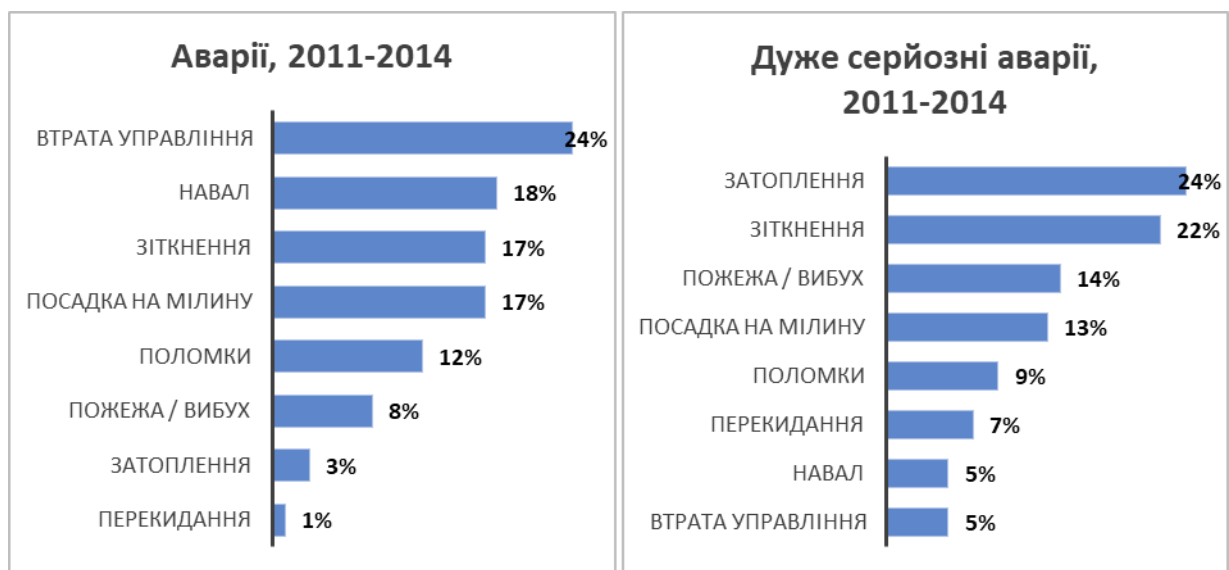


Рис. 1.9. Розподіл аварій за 2011-2014 рр. згідно з даними EMSA



Рис. 1.10. Розподіл аварій за стадіями переходу

При цьому 63% аварій трапилися в обмежених умовах (рис. 1.10).

Незважаючи на позитивні тенденції рівня аварійності, перед сучасним судноплавством стоїть безліч ризиків і викликів.

Крім повної втрати суден з 2006 по 2015 у світі сталося 25434 аварії, пов'язаних з суднами [6]. З них 7820 (31%) пов'язані з несправностями і відмовами механізмів, 3961 (16%) – із зіткненнями і 3930 (15%) – з посадками на мілину.

Почастішали випадки втрати керованості через відмову двигунів. Причинами цього, на думку фахівців, є різкий перехід на паливо з низьким вмістом сірки, а також перехід на «умовне техобслуговування» (condition-based maintenance). У першому випадку присадки, які додаються в паливо при переробці, негативно впливають на стан двигуна. У іншому випадку перехід від обслуговування по годинах напрацювання на умовне обслуговування вимагає високого рівня кваліфікації фахівців і передового діагностичного обладнання для своєчасного визначення та усунення несправностей.

Укрупнення флоту в свою чергу, веде до того, що одинична аварія великотоннажного судна веде до значних втрат. Так, за оцінками AGCS [6],

втрата контейнеровоза вантажомісткістю 19000 TEU може обійтися в 1 мільярд доларів США.

Погодні умови також є важливим фактором, що впливає на безпеку судноплавства. Так у 2015 році в результаті штормової погоди затонуло 4 судна місткістю понад 30 000 рт.

## *1.2 Проблема формалізованої оцінки безпеки комплексної навігаційної задачі*

### *1.2.1 Основні елементи методики формалізованої оцінки безпеки*

Система забезпечення безпеки, здоров'я персоналу та захисту навколишнього середовища, або, як прийнято згідно МКУБ (Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та попередженням забруднення) [104], система управління безпекою (СУБ) на сьогоднішній день є основною частиною системи управління сучасних судноплавних компаній.

Найбільш важливим в роботі цієї системи є її впровадження та подальше коректне функціонування безпосередньо на судах, що розуміє під собою відповідну підготовку персоналу, виховання культури безпеки, контроль за виконанням вимог компанії і зворотний зв'язок.

Статистика показує, що коректне функціонування СУБ дозволяє значно збільшити доходи компанії за рахунок підвищення ефективності роботи флоту та зниження аварійності в цілому.

Враховуючи актуальність даної теми, для кращого розуміння були розглянуті та узагальнені деякі традиційні методи оцінки ризиків.

*Попередній аналіз небезпеки (Preliminary Hazard Analysis, PHA).* Цей метод був початково використовувався армією США на початку 1960-х років з метою аналізу безпеки ракет і з тих пір знайшов застосування у інших областях. Після ідентифікації небезпек, їх потенційних причин і наслідків йдуть можливі превентивні або коригувальні дії. Цей метод можна охарактеризувати як індуктивний і якісний метод та представити у формі таблиці [61].

*Переваги:* Простота у використанні, досить широка область застосування і можливість ідентифікувати небезпеки на ранніх стадіях. РНА може допомогти команді аналітиків розробити операційні рекомендації для застосування протягом усього життєвого циклу системи.

*Недоліки:* Попередні дослідження повинні бути доповнені іншими дослідженнями для досягнення бажаного результату. Часто він передує подальшим дослідженням з аналізу небезпеки.

*Пов'язані розробки:* РНА була удосконалена з метою отримання приблизної оцінки ймовірності виникнення небезпеки та була названа попереднім аналізом небезпеки і ризику (Preliminary Hazard & Risk Analysis, PHRA).

*Аналіз видів та наслідків відмов (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)*

Метод FMEA вперше був використаний у 1960-х роках в авіаційній галузі для аналізу безпеки повітряних суден. Його використання спочатку обмежувалось аеронавтикою, аерокосмічною та ядерною інженерією. Пізніше FMEA став застосовуватися у хімічній промисловості та інших промислових галузях [61].

Процедури включають оцінку впливу кожного потенційного виду відмов компонентів системи на різні функції системи і ідентифікацію потенційних видів відмов, що впливають на доступність, надійність, ремонтпридатність і безпеку системи. Підхід є індуктивним або якісним, і результати можуть бути подані у вигляді таблиці і супроводжуватися рекомендаціями [61].

*Переваги:* FMEA – дуже специфічний і корисний інструмент для оцінки відмов обладнання, спрямований на визначення усіх потенційних видів відмов вже на стадії проектування. Цей метод сприяє плануванню процедур технічного обслуговування відповідно до кожного виду відмов. Він має можливість комплексно враховувати вимоги надійності та безпеки.

*Недоліки:* Метод є трудомістким і тривалим для складних багаторівневих систем. Як правило, він може бути використаний тільки для ідентифікації окремих відмов і тому повинен бути доповнений вивченням поєднання відмов,

що призводять до небажаних подій. Цей підхід не охоплює у достатній мірі людські та організаційні аспекти відмов.

*Пов'язані розробки:* Розширеною версією методу FMEA є аналіз видів, наслідків та критичності відмов (Failure Modes and Effects Criticality Analysis, FMECA), що враховує ймовірність кожного потенційного виду відмови і оцінити критичність його впливу або наслідків. Критичність визначається за показниками «ймовірність-наслідки», хоча FMECA допускає якісне ранжирування. Недавня праця 2002 року робить спробу інтегрувати нечітку логіку з FMEA для зменшення впливу мінливих чинників та/або невизначеності думок різних експертів у процесі оцінки [217].

*Аналіз дерева несправностей (Fault Tree Analysis, FTA).* Цей метод був розроблений на початку 1960-х років компанією Bell Laboratories і вдосконалений компанією Boeing для оцінки ризиків безпеки (прогнозний і кількісний аналіз). Однак цей метод також часто використовувався для аналізу аварій, оскільки він виявляє взаємозв'язок між причинами та їх логікою. Це типовий інструмент у системній інженерії, призначений для застосування в області безпеки та надійності. Це не теорія про причини аварій, а лише метод, який з 1965 року все частіше використовується в ряді промислових секторів, особливо у високотехнологічній промисловості, таких як ядерна, хімічна промисловість та видобуток нафти й газу на морі [188, 206].

FTA охоплює всі компоненти системи, які представлені у вигляді логічної діаграми, що показує, як відмови взаємодіють і призводять до небажаної події (кінцева подія). Цей метод використовує дедуктивний підхід, починаючи з визначення кінцевої події, такої як аварія або інцидент. Основною метою на цьому етапі є виявлення причин або ініціюючих подій та їх логічних взаємозв'язків за допомогою операторів «І»/«АБО» булевої алгебри [214].

FTA – це дедуктивний метод, який використовується для якісного аналізу причин, а також кількісної ймовірнісної оцінки (quantitative probabilistic assessment, QRA). Його формат представляє собою логічну діаграму з ієрархічною деревоподібною структурою [61].

*Переваги:* Дерево несправностей може допомогти систематизувати інформацію про аварію. Метод найбільш підходить для технічних (інженерних) систем, хоча і допускає включення людських помилок або організаційних факторів в якості базових або ініціюючих подій. Його використання може бути класифіковано як просте або складне в залежності від аналізованої системи. Однак FTA вважається одним з найвідоміших методів, що використовуються в аналізі безпеки, особливо для QRA.

*Недоліки:* Метод може бути витратним і більш трудомістким, навіть якщо проводиться із залученням комп'ютера. Дерево несправностей – це не модель для всіх ймовірних подій в системі, це скоріше модель логіки взаємодії між подіями, що призводять до кінцевої події. Схема дерева залежить від навичок аналітика і вміння провести достовірний аналіз, оскільки аналітик може упустити деякі причини [188]. Ці недоліки є основною перешкодою для застосування цього методу в рамках сучасних досліджень.

*Аналіз дерева подій (Event Tree Analysis, ETA).* Цей метод також називають «деревом наслідків»; вперше він був застосований у 1972 році у США для оцінки ризиків, пов'язаних з роботою атомної електростанції [206]. З того часу його стали широко використовувати, особливо в рамках імовірнісної оцінки ризиків на атомних електростанціях.

Основний принцип полягає в тому, щоб дослідити потенційну «послідовність розвитку подій» і дати кількісну (імовірнісну) оцінку кожної можливої послідовності; ETA працює протилежним чином у порівнянні з FTA. Аналіз починають з розгляду «вихідної події», а потім зображують різні шляхи розвитку подій у елементарних системах з метою побудови так званого дерева наслідків [61].

Підхід, як правило, індуктивний і використовується для кількісного аналізу наслідків, а також кількісної (імовірнісної) оцінки ризику.

*Переваги:* - Метод може бути простим або складним в залежності від аналізованої системи. Він допомагає визначити заходи контролю, направлені на



зниження несприятливих наслідків критичних вихідних подій. Підходить для аналізу подій, які можуть мати декілька можливих результатів.

*Недоліки:* - Метод не дає чіткого опису причин виникнення «проміжних подій». Дерево подій може легко стати занадто розгалуженим, і завжди залишається ймовірність того, що не всі потенційні послідовності нещасних випадків будуть ідентифіковані. Побудова дерева залежить від навичок аналітика і його вміння проводити аналіз, тому потребується професійна підготовка [188]. Ці недоліки серйозно обмежують застосування цього методу у сучасних дослідженнях.

*Дослідження небезпеки та працездатності (Hazard Operability Studies, HAZOP).* Цей підхід був розроблений нафтохімічним підрозділом Imperial Chemical Industries у 1963 році у Великобританії. Уперше HAZOP згадується у статті Герберта Г. Лоулі у 1974 році [210]. Вважається, що цей підхід орієнтований на «переробну промисловість», головним чином на хімічну, фармацевтичну та харчову промисловість. HAZOP є методом, заснованим на використанні простих керуючих слів, таких як «Не/Ні», «Більше», «Менше», «Навпроти» і т.д., які допомагають аналітику ідентифікувати відхилення. Він є індуктивним і якісним методом, результати якого можуть бути подані у вигляді таблиці.

*Переваги:* - HAZOP є дуже корисним методом для виявлення високих ступенів небезпеки, що вимагають подальшого аналізу та/або кількісної оцінки, особливо в переробній промисловості. Він може виявити слабкі місця на ранній стадії проектування.

*Недоліки:* - Метод витратний і тривалий за часом та потребує залучення великої команди аналітиків. Це складний процес аналізу, тому деякі небезпеки можуть бути пропущені і не ідентифіковані.

Незважаючи на те, що цей метод широко використовується у нафтогазовій промисловості, через поєднання зазначених вище недоліків і через його залежність від експертної оцінки на основі накопичених даних без належного врахування підвищення безпеки він вважається консервативним. Таким чином,

виникає необхідність впровадження методу, заснованого на застосуванні нечіткої логіки, яка дозволяє мати справу з об'єднаннями інформації.

*Нечітку логіку* можна описати як тип математичної логіки, у якій функції істинності набувають будь-яких значень на відрізку  $[0,1]$ . Нечітку логіку також можна розглядати як форму багатозначної логіки, похідну від теорії нечітких множин, що застосовується для роботи з нечіткими логічними міркуваннями, які є наближеними, а не точними. Формування міркувань, заснованих на нечіткій логіці працює подібно людському розуму, ефективно використовуючи способи міркування, які є приблизними. Це дозволяє описувати правила відображення лінгвістичними, а не в числовими термінами. Інакше кажучи, нечітке міркування спирається на нечіткі множини для визначення нечітких операторів і може бути застосоване у ситуації, де відповідний нечіткий оператор невизначений, що вимагає використання правила if-then або еквівалентних конструкцій, таких як нечіткі асоціативні матриці. Ці правила сконструйовано для вираження знань людини у цифрову систему знань [8]. Одним з найважливіших атрибутів теорії нечітких міркувань є забезпечення систематичної процедури нелінійного перетворення людського знання. Нечітке правило if-then зазвичай виражається у вигляді певних слів, які характеризуються безперервними функціями належності (membership functions, MFs), наприклад «if змінна is властивість, then дія».

Однак, як і будь-який інший метод, нечітке логічне міркування має свої переваги і недоліки, які перелічені у наступних розділах.

*Переваги нечіткого міркування:*

- Здатність інтегрувати експертні знання, інженерні судження, накопичені дані та іншу інформацію з аналізу ризиків для більш послідовної оцінки безпеки та ризиків;
- Цей метод може використовувати неоднозначну, неточну, неповну і невизначену інформацію;
- Ризик можна просто оцінити за допомогою лінгвістичних виразів, які використовуються при проведенні оцінки ризику;

- Пропонує більш гнучку структуру для установлення зв'язку між вхідними даними та висновками.

*Недоліки нечіткого міркування:*

- Вплив людської помилки, що може виникнути в результаті дій ризик-аналітиків.
- Можлива суб'єктивність з боку експерта у визначенні меж.
- Можливі невизначеності та дисперсії при дефазифікації.

Цей метод спирається на здатність знизити рівень невизначеності даних до певної міри, однак для забезпечення більш прийнятних результатів можуть знадобитися подальші вдосконалення.

Формалізована оцінка безпеки (FSA) в останні десятиліття стала невід'ємною частиною всіх видів виробничої діяльності. В першу чергу це пов'язано з вимогами, висунутими страховими компаніями, які по суті стали піонерами в розвитку теорії ризику.

Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та попередженням забруднення (ISM Code [104]), що представляє собою главу 9 Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS-74), вимагає, щоб компанії, які відповідають за експлуатацію суден, визначили своєю метою «оцінку всіх виявлених ризиків для своїх суден, персоналу і навколишнього середовища і створення відповідного захисту». Ця вимога набула чинності з 1 липня 2010 року. Відповідно до вимог ІМО вона має знайти відображення в системах управління безпекою (СУБ), а адміністрації держав повинні контролювати її виконання.

Згідно до рекомендацій ІМО [100] *формалізована оцінка безпеки (ФОБ)* – це структурована і систематизована методологія, спрямована на поліпшення безпеки в морі, включаючи захист життя, здоров'я, навколишнього середовища і власності, шляхом оцінки ризику і відповідних витрат, і переваг.

Отже, всі потенційно небезпечні види робіт повинні бути оцінені на предмет ризиків, і за необхідності повинні бути вжиті заходи щодо їх мінімізації.

Детально процес оцінки ризику описаний як в рекомендаціях ІМО, так і в рекомендаціях класифікаційних товариств та інших міжнародних організацій [2, 3, 108, 89].

На рис. 1.11 представлена блок-діаграма процесу ФОБ. Згідно до загально-прийнятої в морської індустрії методики процес ФОБ складається з п'яти кроків:

**Крок 1.** Ідентифікація небезпек.

**Крок2.** Аналіз ризиків.

**Крок 3.** Пропонування опцій управління ризиками.

**Крок 4.** Аналіз доцільності витрат.

**Крок 5.** Рекомендації щодо прийняття рішень.

В рамках кола задач судноводіння ФОБ може бути застосовано до:

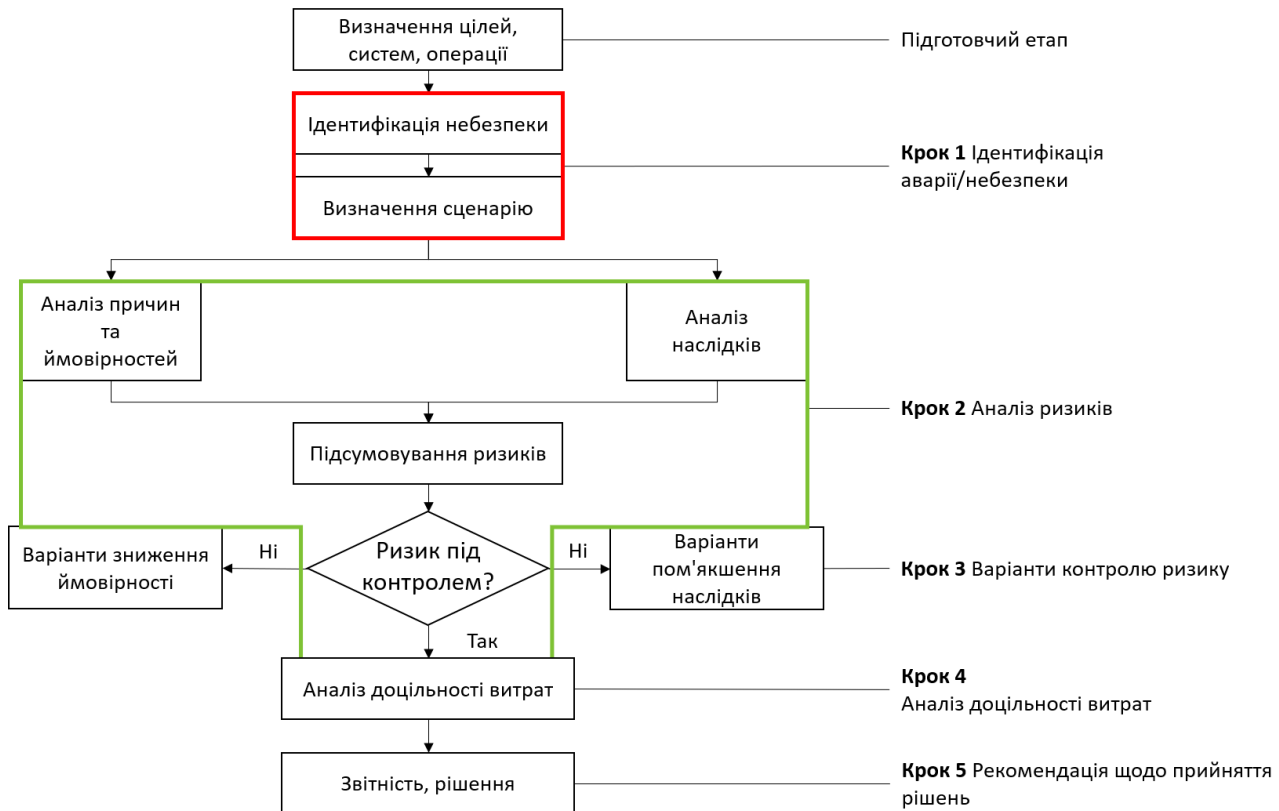


Рис. 1.11. Блок діаграма процесу формалізованої оцінки безпеки

- проектування портів та підхідних каналів;
- планування операцій суден;
- планування маршруту судна;
- бортової чи видаленої системи підтримки прийняття рішень.

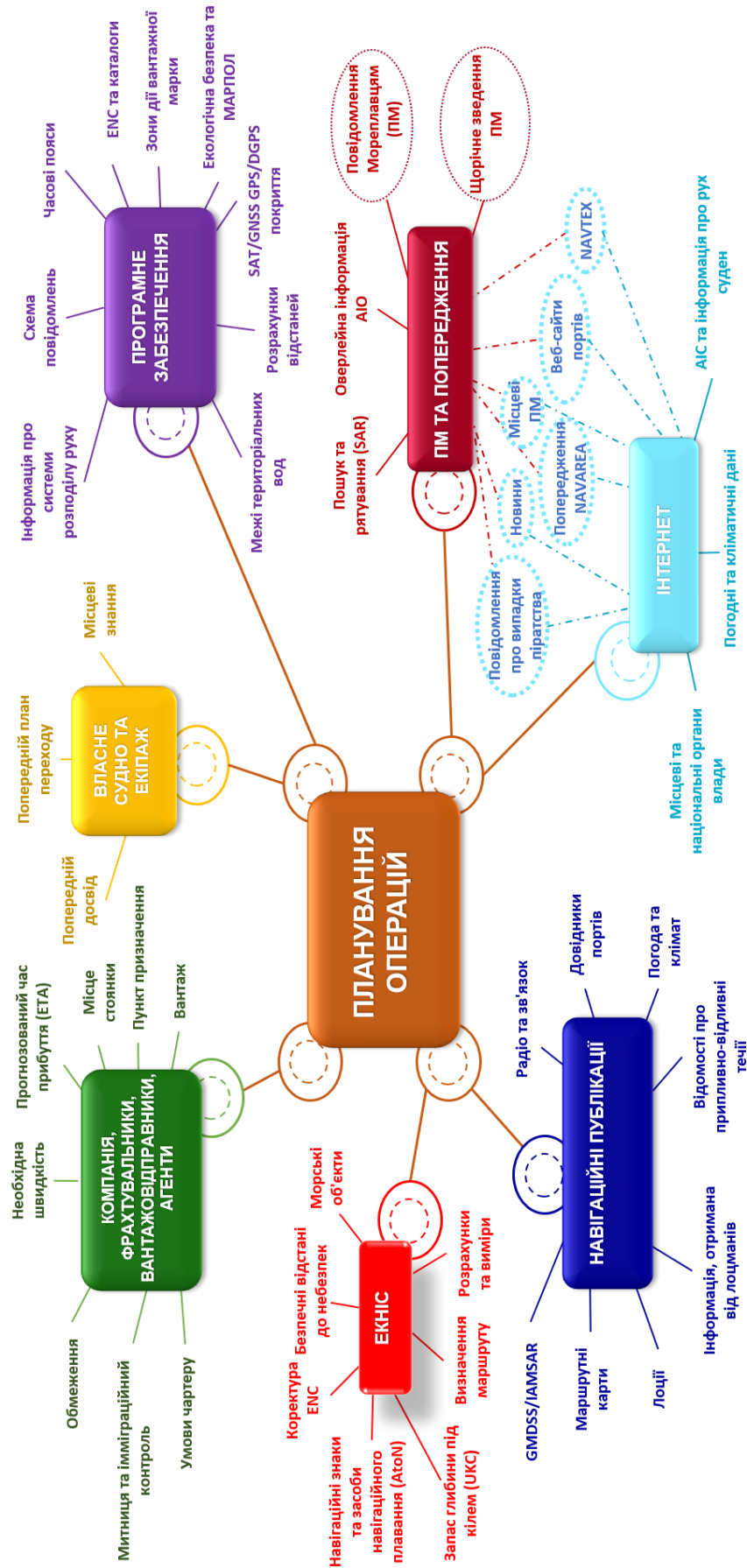


Рис. 1.12. Фактори які впливають на ефективність та безпеку навігаційних задач

Фактори, які зі сторони судна впливають на його безпеку та ефективність, та мають бути враховані під час планування операцій приведено на рис. 1.12.

На цьому етапі важливо визначити основні терміни, пов'язані з ФОБ. Класифікаційні товариства [2, 3, 89], Міжнародна морська організація [100], та Міжнародна організація зі стандартизації [108] посилаючись на такі терміни як ризик, небезпека, інцидент, аварія у своїх публікаціях наводять терміни які можуть відрізнятись один від іншого.

На основі аналізу публікацій [2, 3, 61, 89, 100, 108, 188, 206, 210] запропоновано наступний перелік визначень, які прийнято у цієї роботі:

*Безпека* – стан у якому ризик втрат знижено до мінімально практично-обґрунтованого рівню.

*Ефективність* - співвідношення між досягнутим результатом і використаними ресурсами (ISO 9000: 2015).

Витрати і заходи спрямовані на гарантування безпеки, повинні бути настільки малими наскільки це практично обґрунтовано (ALARP).

*Небезпека* – це стан дія, чи їх комбінація, які можуть привести до втрат (збитку).

Збитків може бути завдано: людському здоров'ю, навколишньому природному середовищу, майну, репутації (особи, організації, країни тощо).

*Ризик* – комбінація імовірності проявлення небезпеки та потенційних наслідків від її проявлення.

*Інцидент* - це незапланована послідовність подій та / або умов, які призводять до збитків або могли спричинити їх.

*Аварія (Accident)* - це незапланована послідовність подій та / або умов, які призвели до збитків.

*Комплексна навігаційна задача* – діяльність судна або групи суден направлена на досягнення поставленої цілі.

*Судно* (згідно до МПЗС-72 [41]) – означає всі види плаваючих засобів, включаючи неводотоннажні судна і гідролітаки, що використовуються або які можуть бути використані як засоби пересування по воді.

Цілі можуть бути комерційні (частіше) та некомерційні. Комерційні цілі включають в себе перевезення вантажів і пасажирів, а також будь-які види діяльності інженерного характеру: буксирування і ескорт, днопоглиблення, різні види морських досліджень, конструювання, забезпечення і обслуговування офшорних платформ та інше.

Незалежно від області застосування методи ФОБ спрямовано на дві цілі:

- *зниження частоти* аварійних ситуацій;
- *зменшення наслідків* аварійних ситуацій.

При цьому у якості індикаторів для попередньої оцінки необхідності введення мір управління ризиками служать:

- *імовірність* виникнення аварійної ситуації, для цілей навігації може визначатися, як співвідношення кількості аварій у судно-роках до загальної кількості судно-років чи судно-операцій (наприклад, проходження заданої ділянки маршруту).
- *тяжкість* наслідків (зазвичай визначається у збитках в грошовому еквіваленті).

Таблиця 1.4. Індекси важкості наслідків (SI)

| SI | ВАЖКІСТЬ НАСЛІДКІВ | ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ ЖИТТЯ                           | ВПЛИВ НА СУДНО                  | S<br>(Еквівалент фатальних випадків) |
|----|--------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | Незначні           | Одна або незначні травми                         | Невелике пошкодження обладнання | 0.01                                 |
| 2  | Значні             | Численні або серйозні травми                     | Нетяжке пошкодження судна       | 0.1                                  |
| 3  | Серйозні           | Один фатальний випадок або численні важкі травми | Серйозне пошкодження            | 1                                    |
| 4  | Катастрофічні      | Численні фатальні випадки                        | Повна втрата                    | 10                                   |

Тобто наведений підхід базується на великій кількості історичних даних, як це наведено у роботах [100, 205, 156, 218]. Наприклад, в роботі [156] приводиться

імовірність зіткнення та посадки на мілину розраховані за період з 1990 по 2012 роки.

У таблицях 1.4 та 1.5 наведені індекси тяжкості та імовірності за логарифмічною шкалою згідно до рекомендацій ІМО [100]. При цьому тяжкість розраховується у як еквівалент смертельних випадків, імовірність у свою чергу розраховується у судно-роках. Ризик у даному випадку рекомендується розраховувати як суму індексів, що відрізняється від стандартної практики помноження індексів [108, 89].

Таблиця 1.1. Індекси імовірності (FI)

| FI | ЧАСТОТА            | ВИЗНАЧЕННЯ                                                                                                                    | F (на судно у рік) |
|----|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 7  | Часто              | Може трапитися один раз на місяць на одному судні                                                                             | 10                 |
| 5  | Дуже вірогідно     | Може трапитися на десяти суднах один раз на рік, тобто може статися кілька разів за період експлуатації судна                 | 0.1                |
| 3  | Вірогідно          | Може трапитися на 1000 суден один раз на рік, тобто може статися кілька разів за період експлуатації декількох подібних суден | $10^{-3}$          |
| 1  | Дуже маловірогідно | Може трапитися на 5000 суден за експлуатаційний період в 20 років                                                             | $10^{-5}$          |

Таблиця 1.2. Індекси ризику (RI)

| Індекс імовірності (FI) |                    | Індекс важкості наслідків (SI) |        |          |               |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------|--------|----------|---------------|
|                         |                    | 1                              | 2      | 3        | 4             |
|                         |                    | Незначні                       | Значні | Серйозні | Катастрофічні |
| 7                       | Часто              | 8                              | 9      | 10       | 11            |
| 6                       |                    | 7                              | 8      | 9        | 10            |
| 5                       | Дуже вірогідно     | 6                              | 7      | 8        | 9             |
| 4                       |                    | 5                              | 6      | 7        | 8             |
| 3                       | Вірогідно          | 4                              | 5      | 6        | 7             |
| 2                       |                    | 3                              | 4      | 5        | 6             |
| 1                       | Дуже маловірогідно | 2                              | 3      | 4        | 5             |



Альтернативне відображення матриці ризику запропоновано IOGP (International Association of Oil & Gas Producers) [152].

Статистика аварійності надає добре ретроспективне відображення ситуації, та може допомогти визначити існування проблеми, але не дозволяє прийняти до уваги індивідуальні характеристики навігаційної задачі під час планування операцій в нових умовах та у випадку ситуативного прийняття рішень.

Таблиця 1.3. Матриця ризику згідно до IOGP

| RISK MATRIX |                                                                             |               |                  |                      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|----------------------|----------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| OUTCOME     |                                                                             |               |                  |                      | PROBABILITY                            |                              |                             |                                              |                                             |
|             |                                                                             |               |                  |                      | A                                      | B                            | C                           | D                                            | E                                           |
|             | People                                                                      | Assets        | Enviro           | Reputation           | Credible but not heard in the industry | Has occurred in the industry | Has occurred in the company | May happen several times per year in company | May happen several times per year on a ship |
| 0           | No injury                                                                   | No damage     | No effect        | No impact            |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
| 1           | FAC                                                                         | Up to \$10K   | Slight effect    | Slight impact        |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
| 2           | RWD or MTC                                                                  | \$10K- \$100K | Minor effect     | Limited impact       |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
| 3           | LTI                                                                         | \$100K - \$1M | Localized effect | Local area impact    |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
| 4           | Single Fatality                                                             | \$1M- \$3M    | Major effect     | National impact      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
| 5           | Multiple fatalities                                                         | Above \$3M    | Massive effect   | International impact |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
|             | INSIGNIFICANT – no action required                                          |               |                  |                      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
|             | LOW RISK – control at workplace level                                       |               |                  |                      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
|             | MEDIUM RISK – requires constant management attention                        |               |                  |                      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |
|             | HIGH RISK – intolerable; reduce at least to medium risk before any exposure |               |                  |                      |                                        |                              |                             |                                              |                                             |

### 1.2.2 Експертна оцінка у задачах ФОВ

Особливістю оцінки ризику складних задач та систем є те, що вхідні дані у загальному випадку є різнорідними, погано піддаються формалізації, або зовсім відсутні (особливо, у принципово нових умовах виконання задачі).

Експерти, як правило, залучаються для ранжирування ризиків, пов'язаних зі сценаріями аварій, або для ранжирування частоти або тяжкості небезпек. Одним із прикладів є ранжування, яке проводиться на початковому етапі ФОБ – ідентифікація небезпеки. Це суб'єктивне оцінювання, де кожен експерт може скласти список сценаріїв аварій, починаючи з найважчих. Для підвищення прозорості результату отриманий рейтинг повинен супроводжуватися коефіцієнтом відповідності, що вказує на рівень згоди між експертами.

Припустимо, що певна кількість експертів (загалом експертів  $J$ ) отримала завдання ранжувати ряд сценаріїв аварій ( $I$  сценаріїв), використовуючи натуральні числа (1, 2, 3, ...,  $I$ ). Експерт " $j$ " тим самим присвоїв ранг  $x_{ij}$  сценарію " $i$ ". Звідси коефіцієнт конкордації " $W$ " може бути обчислений за формулою:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{j=1}^J x_{ij} - \frac{1}{2} J(I+1) \right]^2}{J^2(I^3 - I)}$$

Коефіцієнт  $W$  варіюється від 0 до 1.  $W = 0$  вказує на те, що між експертами немає згоди щодо ранжирування сценаріїв.  $W = 1$  означає, що всі експерти однаково ранжують сценарії за даним атрибутом.

*Таблиця 1.4. Оцінка коефіцієнта конкордації згідно до ІМО [100]*

| <b>W</b>    | <b>Характеристика</b> |
|-------------|-----------------------|
| $> 0.7$     | Добра узгодженість    |
| $0.5 - 0.7$ | Середня узгодженість  |
| $< 0.5$     | Мала узгодженість     |

### *1.2.3 Фактори, які впливають на виникнення аварійних ситуацій*

Фактори, які впливають на виникнення аварійних ситуацій, у загальному випадку, можна поділити на людський та технічний. Виявлення та аналіз факторів, які впливають на рівень ризику виконується на етапі *ідентифікації небезпеки* (крок 1) та прийнято відображати у вигляді моделей ризику. На рис.

1.13 показана модель ризику для ситуацій зіткнення чи посадки на міліну скомпільована на основі робіт [100, 205, 156, 218].

Технічний фактор характеризується надійністю технічного об'єкта, обмеженнями та можливостями його функціоналу та особливостями інтерфейсу (якщо це може бути застосовано до об'єкту).

Людський фактор може проявлятися як на локальному рівні (оператор безпосередньо на судні), так і на рівні управління та організації (представники керуючої компанії на березі). Впливати на імовірність помилок при цьому можуть: підготовка, технічна підтримка, та організація системи у цілому (що включає такі фактори, як організація праці та відпочинку, методи роботи, процедури безпеки та інше).

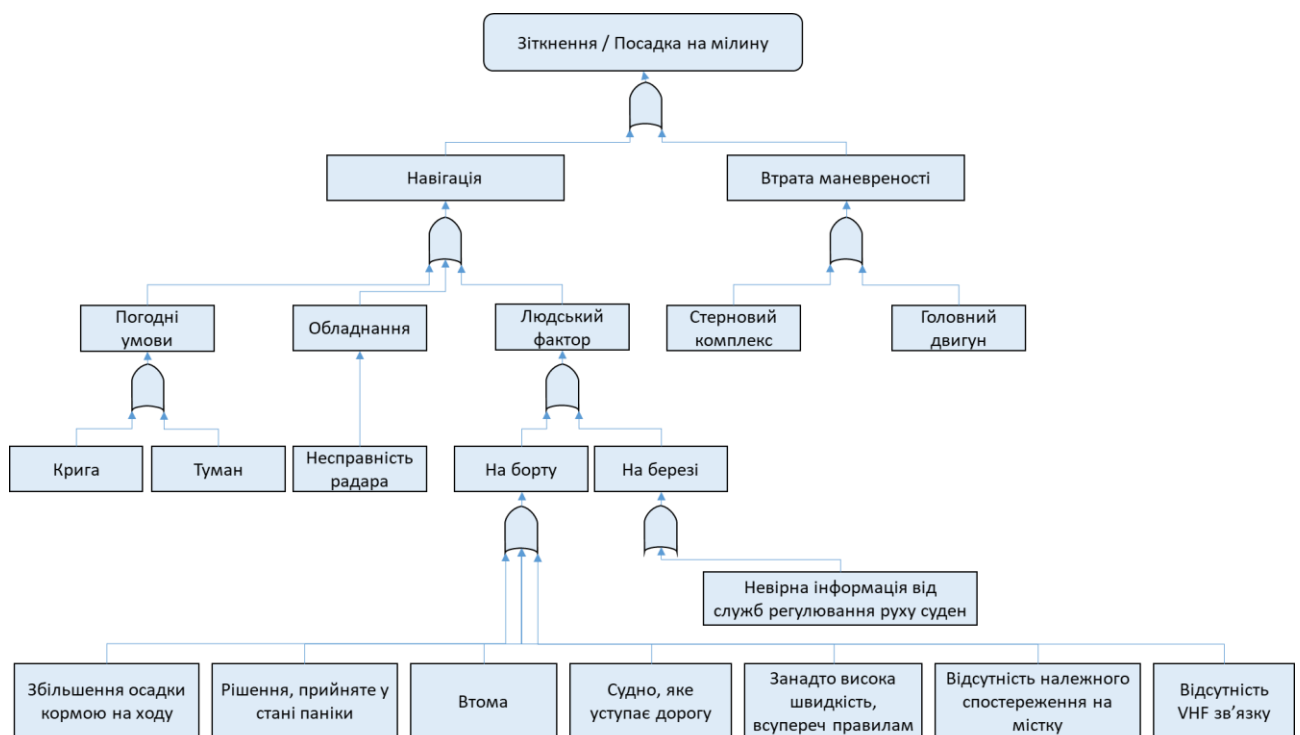


Рис. 1.13. Приклад моделі ризику зіткнення / посадки на міліну

В цілому технічний і людський чинники взаємопов'язані і, з огляду на рівень сучасної автоматизації, взаємодіють в єдиній людино-машинній системі. При цьому, в останні роки значно збільшилася частка участі у процесах управління судном автоматизованих систем обробки та аналізу інформації, що часто слабо відображено в офіційних дослідженнях. При цьому, помилки пов'язані з

можливою складністю інтерфейсу (або їх занадто великою різноманітністю, як, наприклад, у випадку з електронними картографічними системами) або неергономічністю систем оповіщення та сигналізації часто списують на людський фактор, або точніше, - на помилки операторів.

Однією із найбільш важливих стадій ФОБ в рамках гарантування навігаційної безпеки є врахування людського фактору, який згідно до робіт [100, 88, 120] можна розрахувати як:

$$NEP = \frac{N_E}{N_0} \quad (1.2)$$

де NEP – імовірність помилки з боку оператора;  $N_E$  – кількість помилок;  $N_0$  – кількість можливостей для помилки.

На основі аналізу публікацій [2, 18, 75, 85, 87, 88] помилки можна класифікувати, як показано на рис. 1.14.

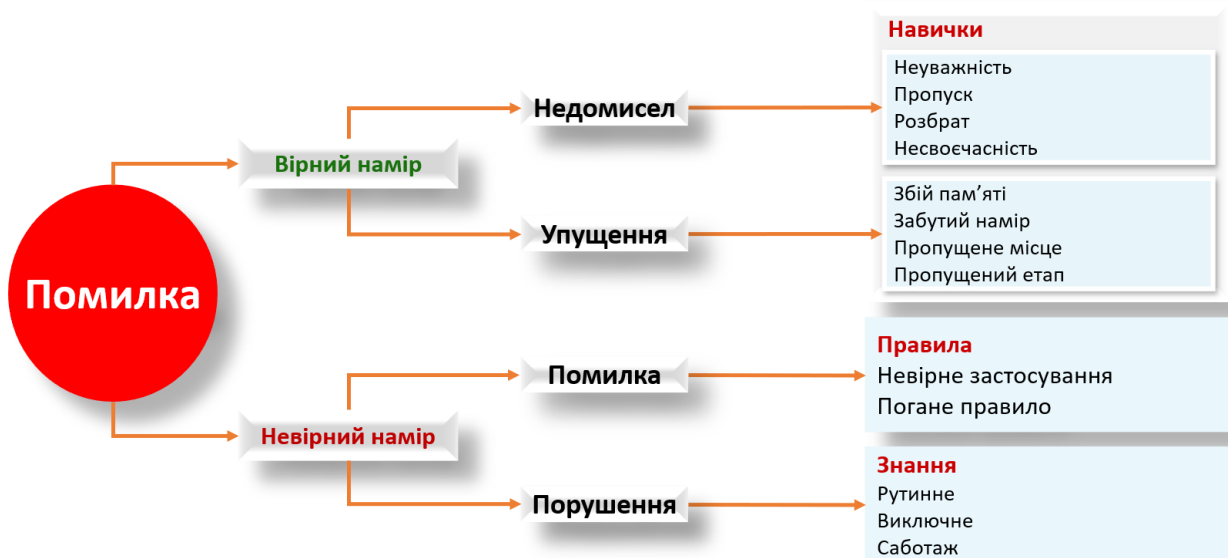


Рис. 1.14. Типи помилок

Згідно до робіт [74, 128, 143, 166, 187] присвячених поведінковим аспектам безпеки помилки, які призводять до інциденту називаються «критичними помилками». При цьому критичним помилкам попереджують певні стани, які створюють більш сприятливі умови для виникнення цих помилок (рис. 1.15).

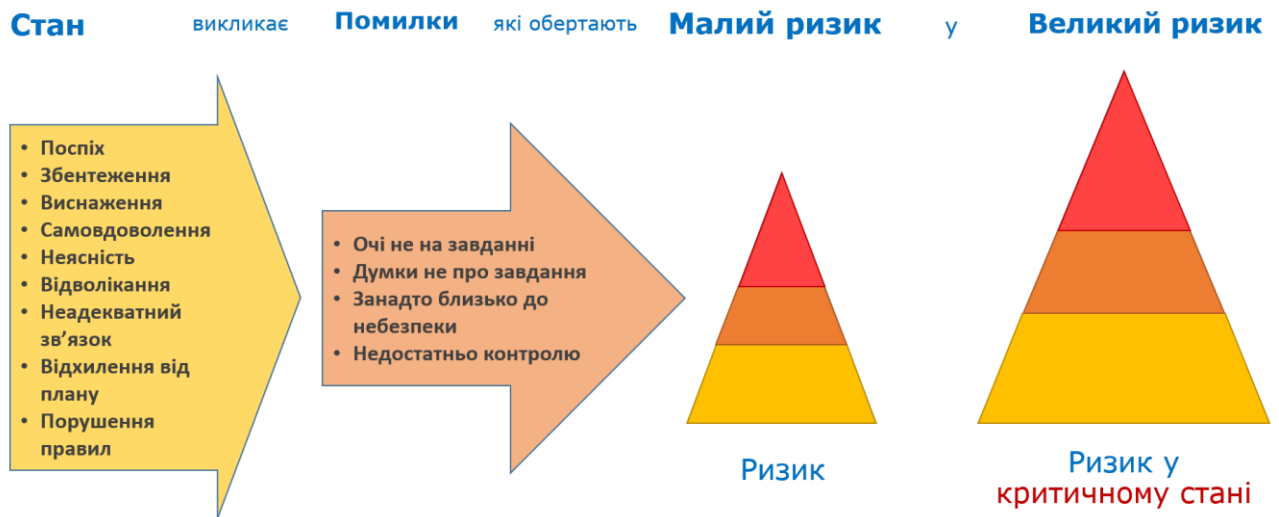


Рис. 1.15. Процес виникнення критичних помилок

Очевидно, що не всі помилки ведуть до аварій. Залежність між помилками або небезпечними діями і аваріями, прийнято відображати у вигляді трикутника Хайнріха (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Трикутник Хайнріха

Згідно до загально-прийнятих у індустрії принципів [13, 152, 100] під час управління ризиками застосовується *ієрархія бар'єрів* (рис. 1.17), від найбільш ефективної міри - повного виключення небезпеки, до найменш ефективної – захисту від небезпеки.

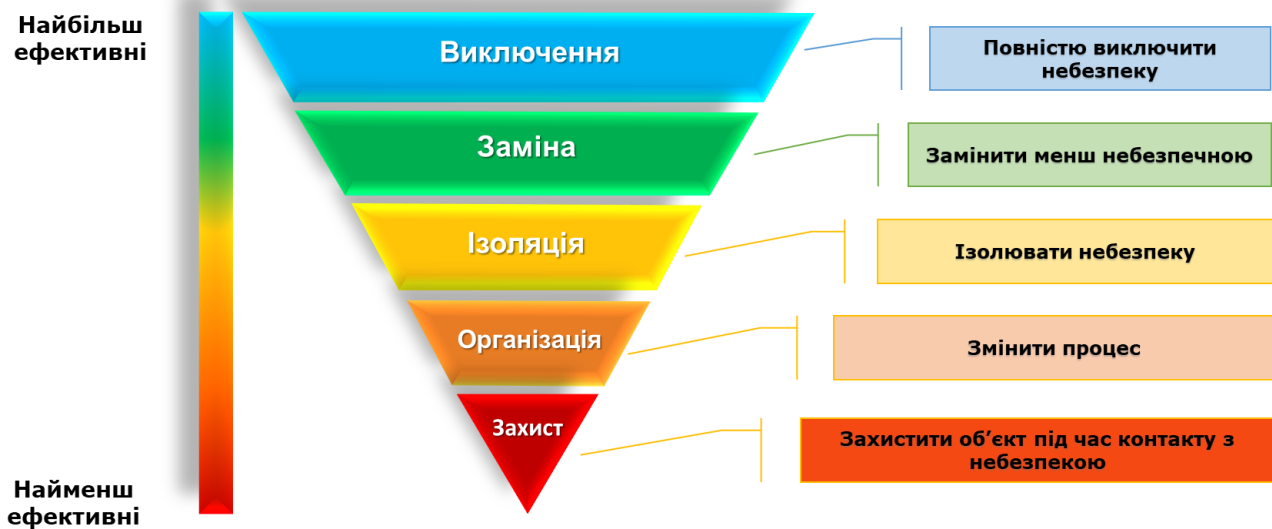


Рис. 1.17. Ієрархія заходів зниження ризику

Важливо відмітити, що незважаючи на досить велику кількість досліджень та публікацій проблема формалізованої оцінки безпеки в морській індустрії базується, в основному, на ретроспективних даних та експертних оцінках.

Логічно припустити, що зменшення кількості небезпечних дій чи станів веде до зниження імовірності аварійної ситуації. Для того щоб ідентифікувати небезпечні дії та поведінку операторів, треба оцінити їх активність безпосередньо до інциденту, та виявити *ланцюжок помилок*, який в кінцевому підсумку привів до інциденту.

### 1.3 Аналіз причин навігаційних інцидентів

#### 1.3.1 Визначення найбільш поширених аварій

Згідно з даними Європейської асоціації з морської безпеки в період з 2011 по 2018 рр. основними причинами 65,8% морських інцидентів стали неправильні дії персоналу [59]. При цьому половина від загальної кількості аварій припадає на навігаційні інциденти.

*Навігаційний інцидент* - це незапланована послідовність подій та / або умов, які призводять до збитків або могли спричинити їх, пов'язана з: зіткненням

суден, посадкою на міліну, пошкодженням судна чи вантажу внаслідок дії погодних умов, чи інша подібна ситуація пов'язана з управлінням рухом судна.



Рис. 1.18. Причини аварій на морі (European Maritime Safety Agency 2019)

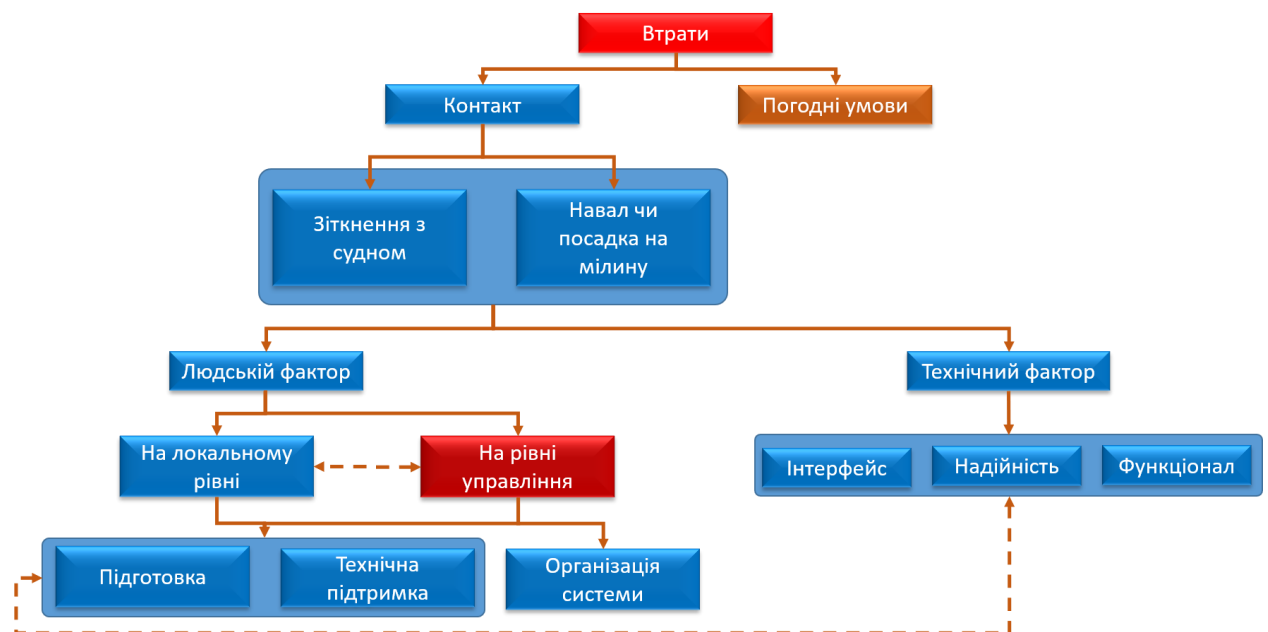


Рис. 1.19. Причини втрат внаслідок навігаційних інцидентів

У період з 2014 по 2018 роки майже половина аварійних ситуацій (45%) були викликані навігаційними помилками, включаючи навал, зіткнення і посадку на міліну: 16% – навал; 16% – зіткнення; 13% – посадка на міліну.

У цілому навігаційні інциденти (рис. 1.19), можна розділити на дві групи: *контактний навігаційний інцидент* (зіткнення, навал чи посадка на міліну) та

*безконтактний навігаційний інцидент* (пошкодження судна чи вантажу внаслідок дії погодних умов, чи інша подібна ситуація пов'язана з управлінням рухом судна).

Проблема оцінки навігаційної небезпеки не є новою і була досліджена багатьма авторами. Зростання інтенсивності судноплавства з одного боку і технологічний прогрес з іншого стимулюють появу більш досконалих методів оцінки небезпеки зіткнення і підтримки прийняття рішень судноводіїв.

Однак стійка тенденція аварій до зіткнень суден, пов'язаних з діями судноводіїв, обумовлює необхідність більш детального аналізу причин, що призвели до аварій.

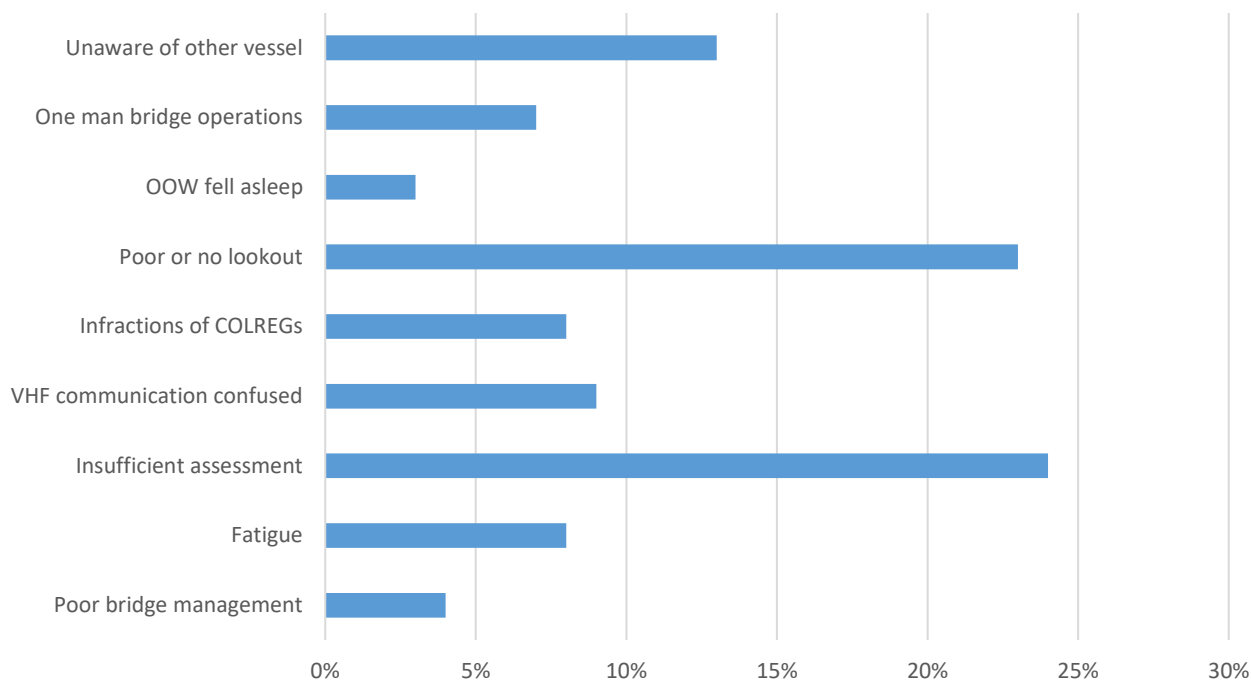


Рис. 1.20. Причини зіткнень морських суден

Статистика, отримана у результаті розслідування інцидентів, не завжди є достатньою для отримання об'єктивної інформації. Моделювання складної навігаційної обстановки і сценаріїв, схожих на реальні інциденти, з іншого боку, дозволяє зібрати більше статистичних даних, провести більш глибокий аналіз прямих і непрямих факторів, що збільшують ймовірність зіткнення, а також відстежити ефективність заходів, спрямованих на зменшення цієї ймовірності.



Аналіз причин навігаційних аварій [59, 132, 270] показує, що судноводії часто або не бачать небезпеки, або неправильно оцінюють пов'язані з небезпекою ризики. Наочно це відображають статистичні дані (рис. 1.20), наведені в роботі [132].

І якщо проблема безперервного спостереження згідно з правилами МППЗС [41] несе переважно дисциплінарний характер, то проблема оцінки ризику, пов'язаного з небезпекою, є більш складною.

Будь-яка навігаційна задача включає в себе геометричний і часовий фактори. Співвідношення розмірів судна, його маневрених характеристик і близькість навігаційної небезпеки зумовлюють геометричний фактор [145, 273]. У той же час швидкість наближення до небезпеки і швидкість зміни параметрів руху зумовлюють часовий фактор.

У правилах запобігання зіткненню суден МППЗС [41] та в інших джерелах широко використовується термін *небезпечне зближення (close quarters)*, проте офіційне визначення цього терміна в публікаціях ІМО не наводиться.

Під небезпечним зближенням, як правило, [32, 132, 145, 254, 233, 232, 248] мається на увазі ситуація, у якій ризик зіткнення особливо високий. У літературі можна знайти приблизний діапазон значень *дистанції небезпечного зближення* рівний 2-4 милям.

### 1.3.2 Аналіз терміну «маневр останнього моменту»

Іншим поширеним терміном є *маневр останнього моменту* [132, 145, 254, 233, 232, 248], який розглядається як аварійний маневр, що дозволяє уникнути зіткнення з судном. Однак цей термін також не має формального визначення.

У МППЗС, в свою чергу, не визначені і навіть не наведені чіткі критерії розрахунку мінімальної дистанції розходження.

Неоднозначність у визначенні граничних умов безпечного розходження суден веде до того, що судноводії часто не усвідомлюють настання ситуації *маневру останнього моменту (МOM)*.

Дослідження та рекомендації щодо визначення «останнього моменту» наведені в ряді публікацій [132, 145, 233, 248].

У статті [233] показана математична модель для ситуації зближення суден на пересічних курсах. У роботі [233] наведені методи розрахунку геометричних параметрів маневру та рекомендації щодо вибору МОМ: циркуляція на лівий або правий борт, гальмування. У роботі [248] запропоновано емпіричний спосіб оцінки ситуації небезпечного зближення.

Однак в цих публікаціях при розрахунку геометричних параметрів маневру значення швидкості маневруючого судна вважається постійним, в той час як на циркуляції швидкість зменшується практично в два рази, що впливає і на час, і на дистанцію розходження. Розміри суден також мають критичне значення при розходженні на близьких дистанціях, особливо враховуючи те, що сучасні великотоннажні судна досить часто мають довжину 300-400 метрів. Найбільш коректно це враховано в роботі [145], де зіткнення визначається з умови перетину двох геометричних областей, які характеризують судна. Водночас всі розрахунки в роботі [145] були отримані в істинному русі, а основним параметром при розрахунках є мінімальна дистанція між суднами. У такому випадку значно збільшується кількість можливих сценаріїв розвитку ситуації розходження, що, відповідно, призводить до значного збільшення ітерацій і погіршення точності в роботі алгоритму визначення ймовірності зіткнення.

У роботі [248] оцінка небезпечної ситуації проводиться відносно прогнозованої точки зіткнення, що є більш коректним, проте функція визначення мінімальної дистанції до цієї точки залежить тільки від довжини і швидкості судна, що не дозволяє врахувати його маневрені характеристики.

Визначення «останнього моменту» і «дистанції небезпечного зближення» є важливим не тільки для того, щоб позначити судноводію момент початку виконання аварійного маневру, але і, в залежності від маневрених властивостей

і розмірів судна, провести оцінку ситуації загалом і визначити безпечну дистанцію та час найкоротшого зближення, що на сьогоднішній день є можливим завдяки даним, одержуваним з АІС (автоматичної ідентифікаційної системи).

### *1.3.3 Моніторинг та ідентифікація помилок при навчанні на навігаційних симуляторах*

У процесі проведення курсів підвищення кваліфікації судноводіїв при ІПО ЦПАП НУ «Одеська морська академія» у 2019-2020 рр. фіксувалися дані про проходження задач на симуляторах навігаційного містка Wartsila Navi Trainer 5000 з різними типами суден у різних районах та умовах плавання. Симулятор дозволяє в реальному часі відображати дистанцію найкоротшого зближення і спостерігати прогнозовану тенденцію руху суден.

У якості аварійних було виділено дві ситуації: *небезпечне зближення і зіткнення*.

У даному випадку під *небезпечним зближенням* розумілася ситуація, у якій відстань між суднами була менше дистанції *маневру останнього моменту*, при цьому *найкоротша дистанція в процесі розходження була менше, ніж задана*.

Грунтуючись на роботі [273], дамо наступне визначення небезпеки зіткнення: *небезпека зіткнення існує, якщо середнє значення пеленга на інше судно з плином часу не змінюється, а відстань між суднами зменшується*.

Щоб визначити наявність ситуації *небезпечного зближення* при плаванні у відкритому морі, використовувалася фіксована величина дистанції найкоротшого зближення (наприклад, 1 морська миля).

Помилки, допущені судноводіями, які призвели до зіткнення або небезпечного зближення, було запропоновано розділити на 3 основні категорії: невірна оцінка ситуації, невірний маневр, невірне планування (рис. 1.21). Далі розкриємо значення помилок, наведених на рис. 1.21.

**Невірна оцінка ситуації** включає в себе три помилки:

- небезпека не була виявлена;
- судно-ціль було виявлено, але небезпека не усвідомлена;
- небезпека була виявлена і усвідомлена, але помилки обладнання не були враховані.

Зокрема, наступні фактори можуть впливати на оцінку СРА:

- Згідно [96], похибка визначення СРА засобом автоматичної радіолокаційної прокладки може досягати 0.3 nm.
- Якщо перевіряти СРА по АІС (автоматична ідентифікаційна система), ця дистанція може бути нестабільною і приймати різні значення, які залежать від коливань судна-цілі і точності його датчиків.
- Не були враховані розміри судна-цілі та/або розташування антени радара на власному судні.

**Невірний маневр.** Якщо інерційність і маневреність власного судна враховані невірно, маневр може бути закінчений не настільки рано, як очікувалося. Особливо, якщо спочатку судноводій зменшує швидкість, а потім маневрує курсом. Зменшення швидкості, відповідно, знижує поворотність судна. Для того щоб досягти тієї ж кутової швидкості на понижених ходах, стерно потрібно перекладати на великі кути. Про це часто забувають.

Крім того, автостерновий, від початку налаштований для океанського переходу, може не реагувати настільки швидко, наскільки потрібно. Тому слід враховувати кут повороту і реалістичну кутову швидкість. Якщо встановлена в АР кутова швидкість становить  $20^{\circ}/\text{хв}$ , то поворот на  $40^{\circ}$  може зайняти близько 3-х хвилин. Таким чином, щоб досягти бажаної СРА, слід починати поворот як мінімум за 3 хвилини.

З іншого боку, ручне управління дозволяє досягти більш швидкого ефекту, проте негативно впливає на контроль над ситуацією. Як тільки судноводій переходить на ручне управління, його увага повністю концентрується на штурвалі і репітері компаса.

Судноводії досить часто ігнорують можливість маневру швидкістю. Правило 8 МППЗС [41] рекомендує зміну курсу, якщо *"there is sufficient sea-room available"*. Але в тому ж правилі написано: *"...If necessary to avoid collision or allow more time to assess the situation, a vessel may slacken her speed or take all way off by stopping or reversing her means of propulsion"*.

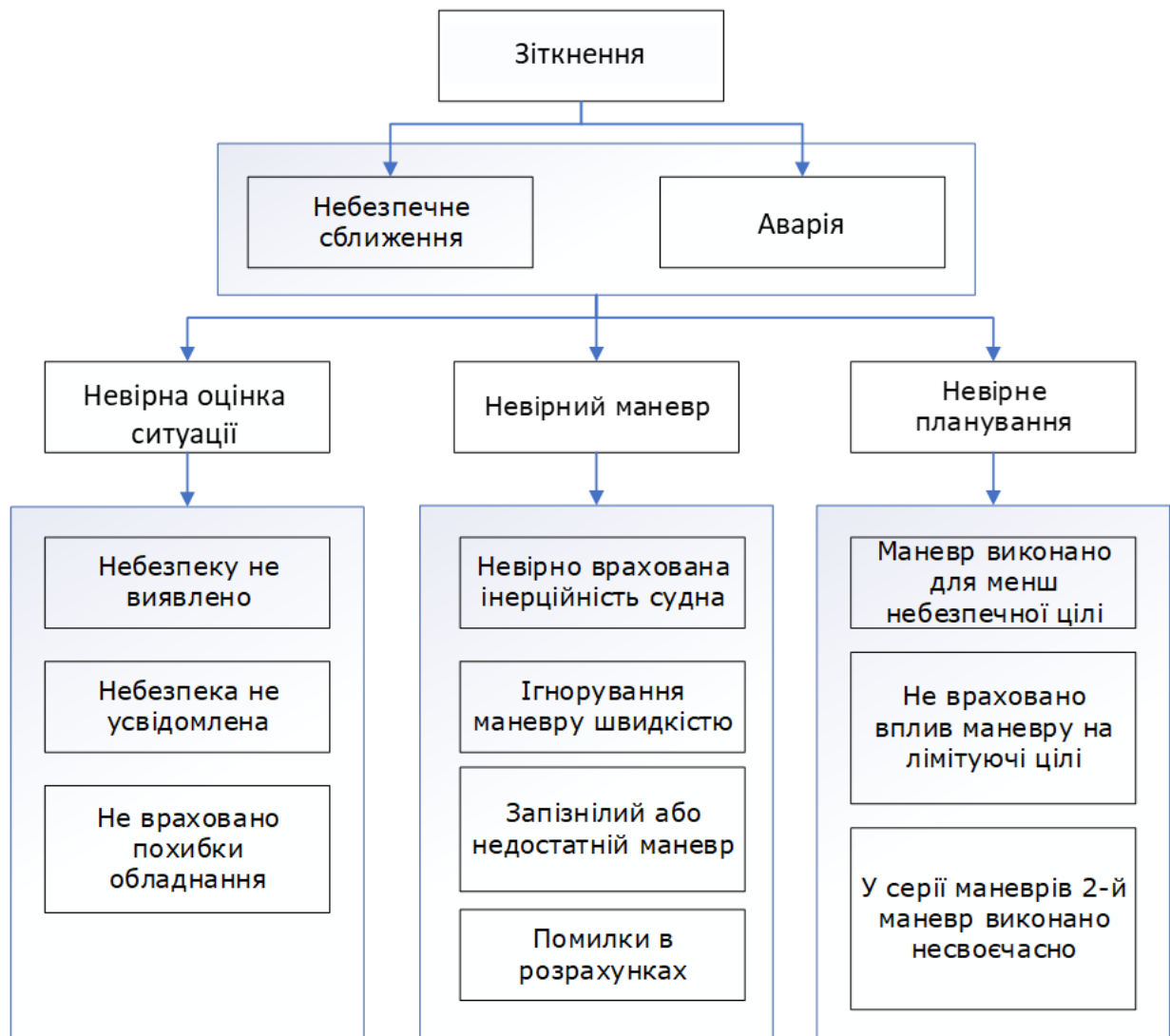


Рис. 1.21. Структура помилок, які можуть призвести до зіткнення

Слід враховувати, що зниження з повного маневреного ходу великотоннажного судна займає, як правило, 5-10 хвилин. Однак маневр може бути виконаний швидше, якщо зменшити обороти гвинта до мінімальних, навіть без зупинки або реверсування. Так як на менших ходах судно повертає повільніше, зважаючи на менший упор від гвинта на пері стерна, можна

використовувати «поштовхи» (короткочасне різке збільшення оборотів гвинта), для того щоб досягти необхідної швидкості повороту.

**Невірне планування** пов'язане з вирішенням комплексних навігаційних задач, коли потрібно спланувати порядок маневрування з декількома цілями, тако **Не враховується, як маневр з одним судном вплине на ситуацію з іншим**. На рис. 1.23 судно В зліва первісно проходить чисто по носу і не зобов'язане вживати дії для запобігання зіткнення. Однак маневр власного судна вправо для судна А може «підтягнути» судно В на небезпечно близьку дистанцію і привести до ситуації, коли судно В не може уникнути зіткнення власним маневром. Це відбувається через те, що при повороті вправо лінія відносного руху (ЛВР) судна попереду траверзу розгортається за годинниковою стрілкою. ж беручи до уваги стаціонарні навігаційні небезпеки.

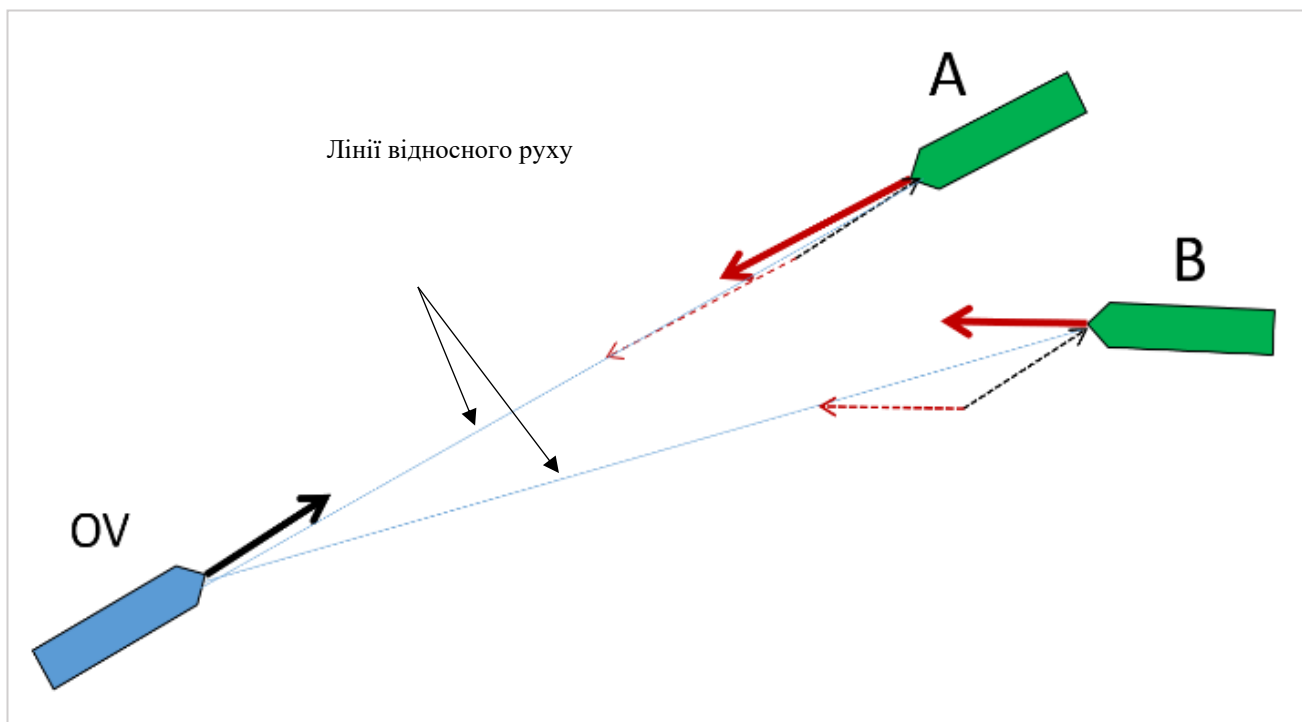


Рис. 1.22. Розходження з 2-ма зустрічними цілями

**Виконання маневру для менш небезпечної цілі.** При розходженні з декількома суднами необхідно визначити, які цілі є лімітуючими, а які – найбільш небезпечними. У випадку, показаному на рис. 1.22, досить часто штурмани прораховують маневр для перетинаючого судна В. Проблема полягає в тому, що, якщо судно А не зманеврує (припустимо, що в нього є обганяюче

судно праворуч, або водного простору для маневру недостатньо), власне судно опиниться небезпечно близько до нього. Це викликано тим, що ТСРА (час до найкоротшого зближення) з ним більше, і, відповідно, для розходження на безпечній дистанції необхідна більша зміна курсу.

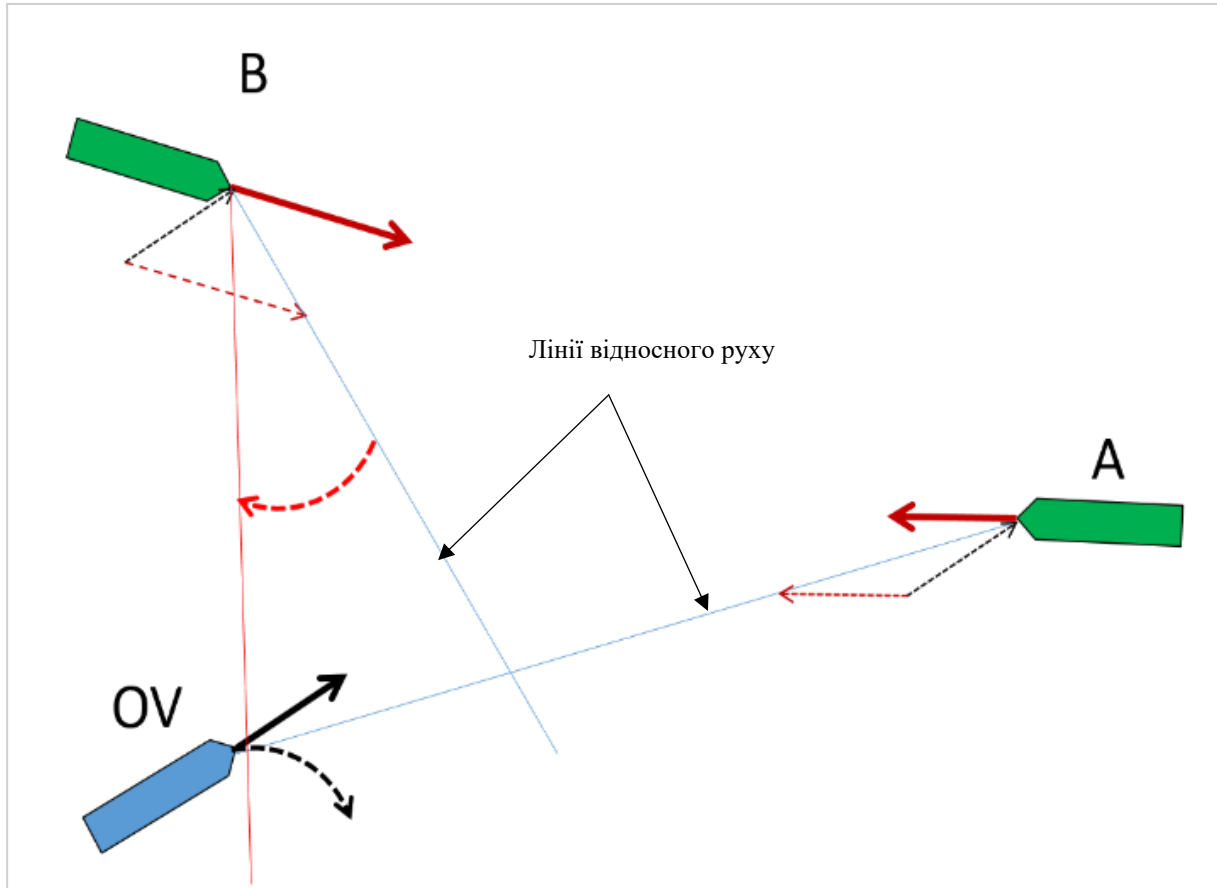


Рис. 1.23. Розходження з 2-ма цілями, що перетинають курс

**Виконання 2-го маневру занадто рано, коли 1-ша ціль не пройдена.** У ситуації, зображеній на рис. 1.24, штурман може віддати перевагу зниженню швидкості, щоб поступитися дорогою судну В (яке приблизно  $10^\circ$  позаду траверзу). Однак це значно не покращує ситуацію з судном А, обмеженим у можливості маневрувати, а лише трохи збільшує ТСРА. Важливим в даній ситуації є визначення моменту, коли судноводій може почати повертати вправо, не зменшуючи СРА з судном В. Особливістю відносного руху в цьому випадку є те, що ЛВР позаду траверзу праворуч при зменшенні швидкості повертає проти годинникової стрілки, однак, коли ціль В опиниться попереду траверзу, поведінка ЛВР зміниться, і при повороті власного судна вправо ЛВР буде повертатися за годинниковою стрілкою.

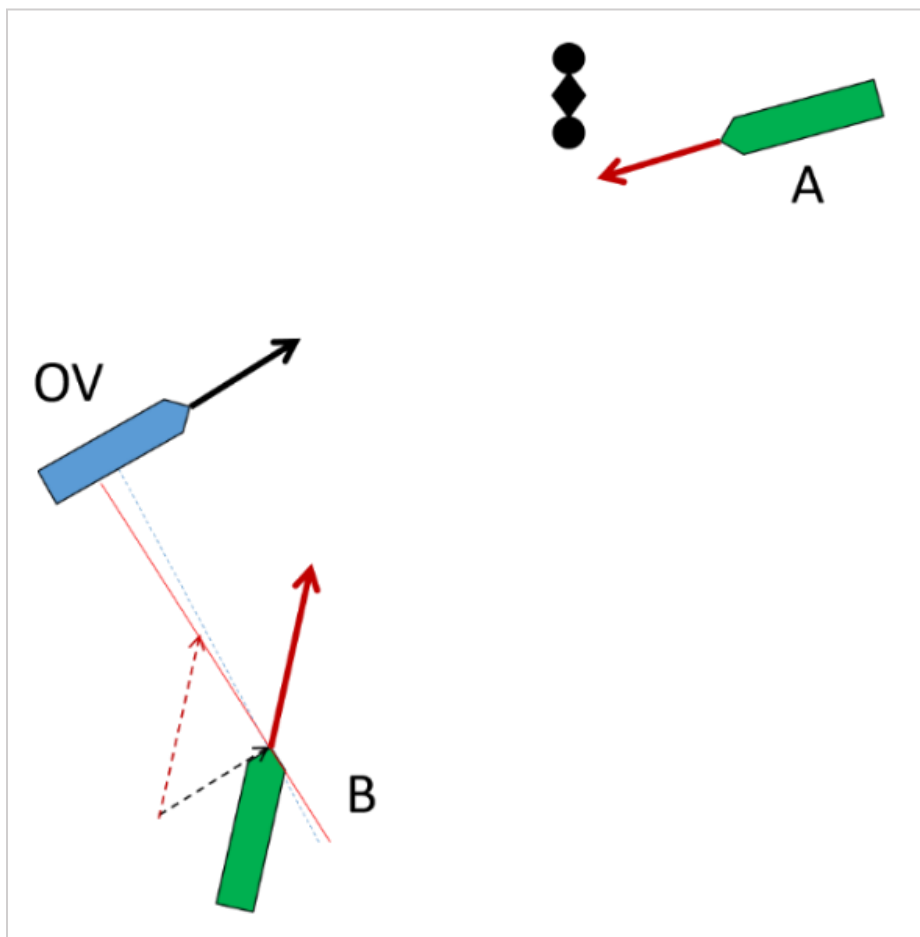


Рис. 1.24. Розходження комбінованим маневром



Рис. 1.25. Розподіл основних причин інцидентів при підготовці судноводіїв на симуляторах навігаційного містка, %



На рис. 1.25 наведені результати обробки інформації, зібраної у ході більше ніж 200 вправ, виконаних судноводіями на тренажерах. Як видно, найбільш частими були помилки, пов'язані саме з маневруванням судна, що дещо відрізняється від даних наведених на рис. 1.20, однак обумовлюється тим, що при проходженні задач на симуляторі судноводій більш уважний, так як заздалегідь очікує труднощів.

Аналогічні спостереження було проведено відносно, помилок, які призводять до посадки на мілину. Якщо у випадку з зіткненням суден основним інструментом оцінки компетентності є радар, у випадку посадки на мілину основним інструментом є ЕКНІС. Для перевірки знань користувача ЕКНІС для різних посад (капітан, старший помічник, 2-й помічник, 3-й помічник, молодший помічник, кадет) використовувалися задачі для різних районів плавання, які включають в себе завдання на створення маршруту переходу (прокладку маршруту, розрахунок безпечних глибин, правильне використання налаштувань безпеки ЕКНІС, оцінку переходу на наявність небезпек, побудова "No-Go Area", контроль датчиків інформації). Аналіз причин помилок показує, що судноводії часто або не бачать небезпеки, або неправильно оцінюють пов'язані з небезпекою ризики. До того ж, ці помилки не пов'язані безпосередньо з досвідом роботи і займаною посадою. Наочно це відображає статистичний аналіз помилок судноводіїв за посадами.

Неправильна інтерпретація символів ЕНК спостерігається серед усіх посад судноводіїв, незалежно від їх досвіду роботи і, що особливо насторожує, неправильна інтерпретація символів навігаційних небезпек.

Надзвичайно важливо, щоб контур безпеки, безпечні глибини були правильно введені. В іншому разі неухважність або нерозуміння концепції безпечного контуру можуть призвести до посадки судна на мілину. Ця помилка часто виникає в результаті неправильного використання інформації зон довіри, неправильної оцінки мінімальних глибин на маршруті, неправильного розрахунку впливу приливних рівнів.

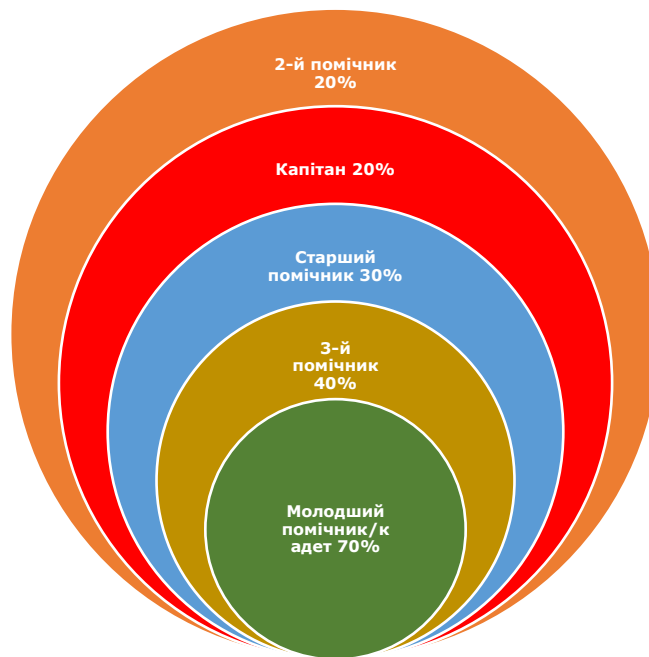


Рис. 1.26. Неправильна інтерпретація символів ЕНК (ENC)

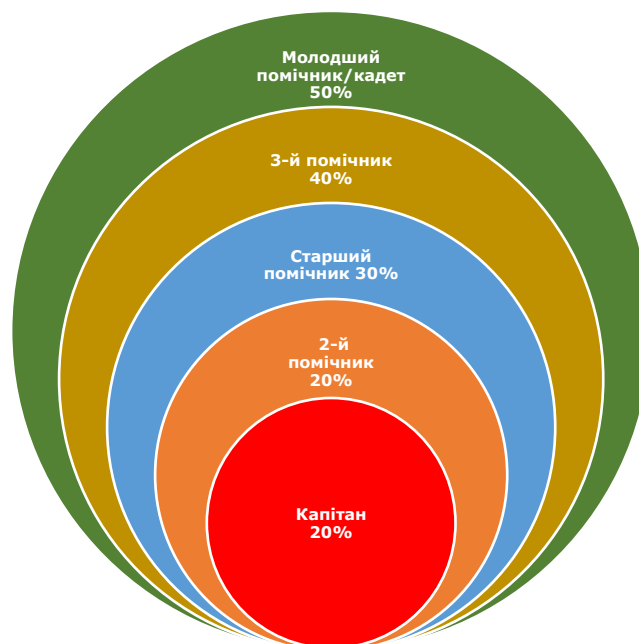


Рис. 1.27. Неправильна прокладка курсів переходу (перетин небезпечних глибин або мілководного контуру, неправильна оцінка небезпек згідно зон довіри), що має призвести до посадки судна на мілину

Проведений аналіз помилок, отриманий в результаті тестування судноводіїв різних посад і з різним досвідом роботи, показує: рівень капітан-старший помічник – недостатнє знання функціональної особливості ЕКНІС; рівень 2-й навігаційний помічник – досить повне знання функціональної

особливості ЕКНІС; рівень 3-й помічник, молодший (junior) помічник, кадет – слабка знання функціональної особливості ЕКНІС.

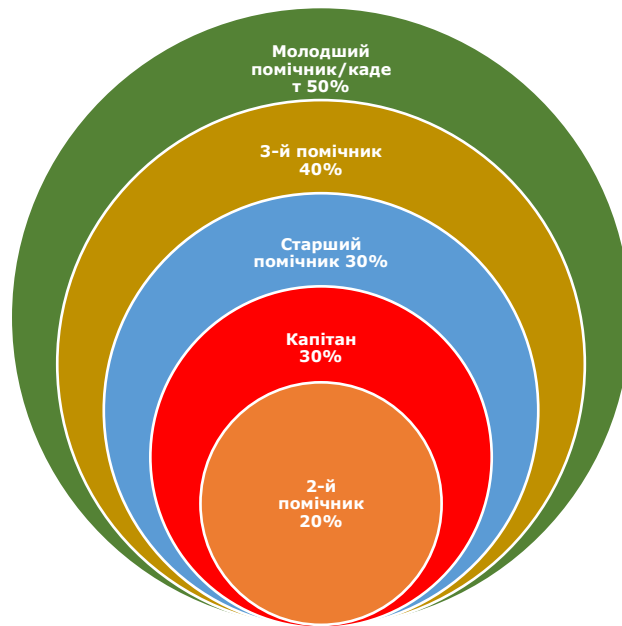


Рис. 1.28. Неправильний розрахунок безпечної глибини для судна, неправильне встановлення безпечного контуру

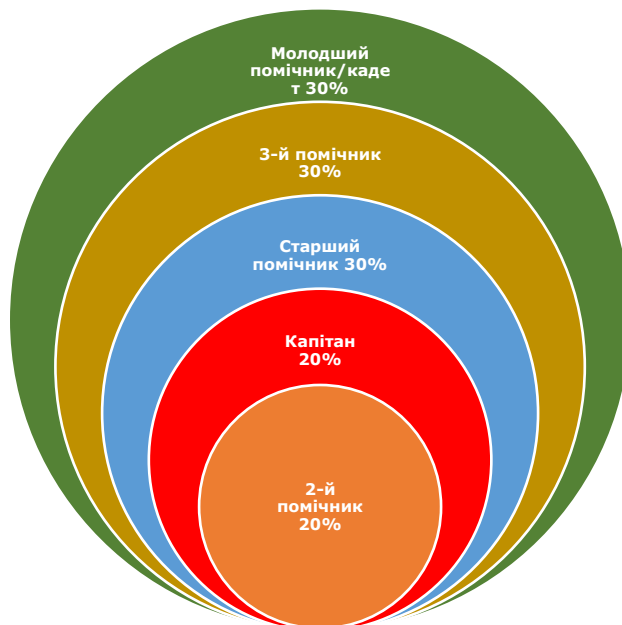


Рис. 1.29. Неправильна побудова "No Go Area"

Результати «ЕКНІС тестування», безперечно, показують, що з усіх помилок, пов'язаних з використанням ЕКНІС, які допускаються судноводіями різних рівнів, найбільш поширені пов'язані з неправильним встановленням

параметрів безпеки маршруту, незнанням систем індикації і сигналізації про ситуації і стани, що вимагають заходів або уваги з боку судноводія, а також з відсутністю повної перевірки і оцінки маршруту. Існує ризик встановлення невірних параметрів безпечних глибин (depths, safety contours) і навігаційних попереджень.

Також спостерігається, що звукові попереджувальні сигнали судноводії часто відключають без вагомих причин. Коли звукові сигнали звучать занадто часто, існує ризик, що у судноводія може виробитися небезпечна звичка, яку називають несприйнятливістю до сигналів тривоги. Судноводій просто не звертає уваги на звукові сигнали і навіть не перевіряє монітор, щоб дізнатися, чим вони викликані.

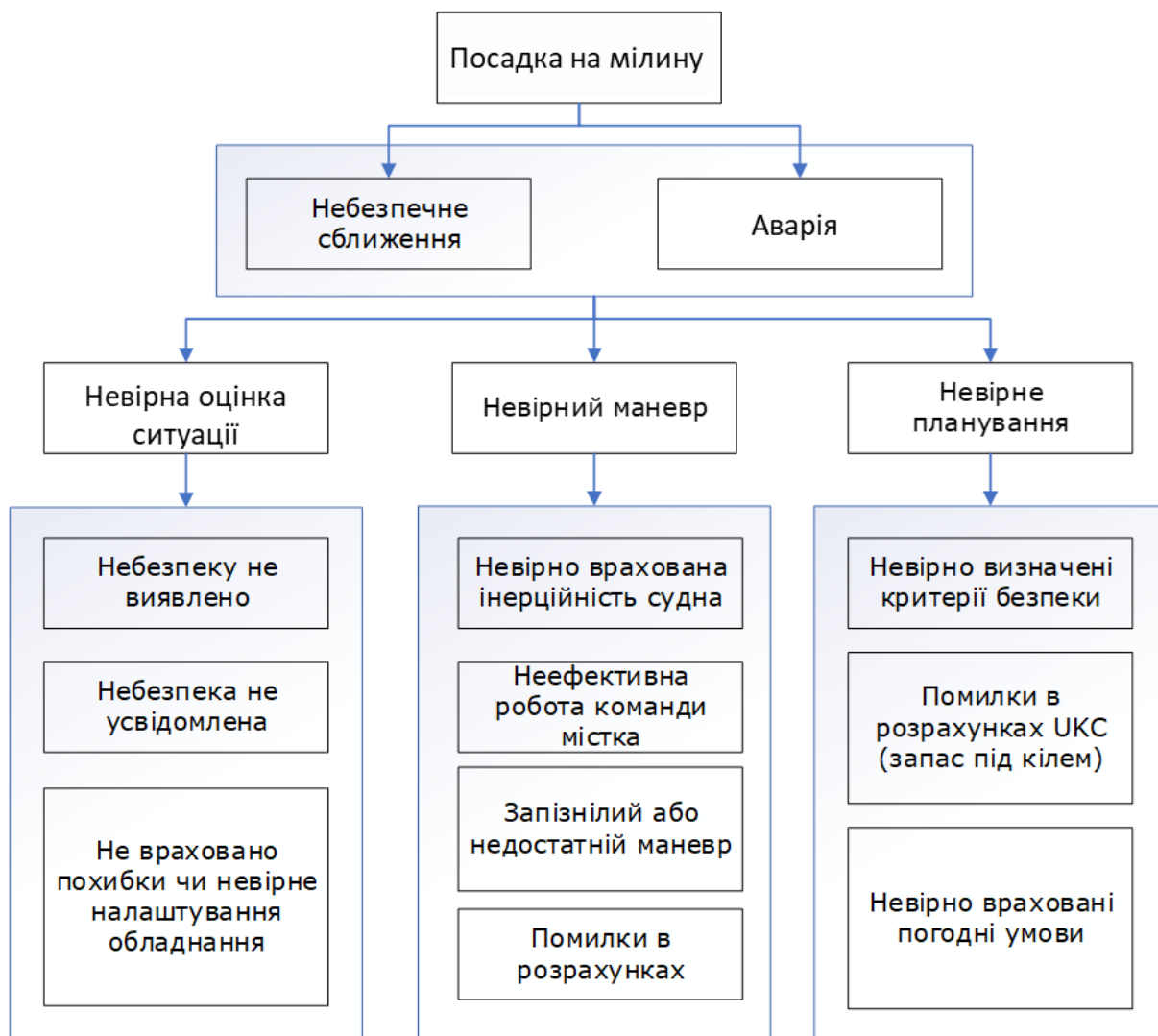


Рис. 1.30. Структура помилок, які можуть призвести до посадки на міліну

Під час виконання вправи "Manual fix position" (вихід з ладу GPS) судноводії губляться при переході на візуальні визначення місцеположення судна на ЕНК при плаванні в прибережних водах і особливо у вузькостях. Цю ситуацію можна пропрацювати лише на тренажері, що свідчить про втрату навичок швидкого, точного і систематичного визначення місця судна на паперових картах.

Результати, отримані шляхом аналізу помилок, корелюються з результатами досліджень, опубліковані в звітах МАІВ про морські аварії, пов'язані з неналежним використанням ЕКНІС [138]: незнанням значень параметрів безпеки, сигналізації, і особливо з функціями Safety Frame та XTD. Аналіз помилок, які припускаються судноводіями різних посад і з різним досвідом роботи, збігається з висновками робіт [136, 202].

Проведений аналіз виявляє тривожно низький рівень використання знань про можливості ЕКНІС, що безпосередньо ставить під загрозу безпеку судноплавства. Отримані результати, безсумнівно, свідчать про необхідність внесення відповідних змін до підготовки кадрів і активізації вивчення тих сегментів використання ЕКНІС, у яких судноводії різних рівнів показали найгірші результати.

Класифікацію помилок судноводіїв, які можуть привести до посадки на мілину показано на рис. 1.30.

### *Висновки за розділом I*

У розділі проведено аналіз аварійності морського флоту. Зроблено висновок, що протягом останнього десятиліття обсяги перевезень, кількість і тоннаж світового флоту продовжували збільшуватися. Крім міжнародної торгівлі також стрімко розвивався морський енергетичний сектор, як в області розвідки, глибоководного буріння, видобутку газу та нафти, так і побудови альтернативних джерел енергії таких як вітрові генератори.

Інтенсифікація людської активності у морі та ускладнення операцій, пов'язане зі збільшенням кількості і розмірів суден, ведуть до відповідного збільшення ризиків, що відносяться до цих операцій.

За даними EMSA (European Maritime Safety Agency) у період з 2014 по 2018 роки майже половина аварійних ситуацій (45%) були викликані навігаційними помилками, включаючи навал, зіткнення і посадку на мілину: 16% – навал; 16% – зіткнення; 13% – посадка на мілину.

З метою надання морської індустрії інструментів для оцінки заходів, пов'язаних з підвищенням безпеки операцій морського транспорту ІМО були розроблені рекомендації по формалізованій оцінці безпеки (ФОБ). У розділі проведений огляд методів і концепцій оцінки безпеки, запропонованих в рекомендаціях.

Важливо відмітити, що незважаючи на досить велику кількість досліджень та публікацій проблема формалізованої оцінки безпеки в морській індустрії базується, в основному, на ретроспективних даних та експертних оцінках.

Статистика аварійності надає добре ретроспективне відображення ситуації, та може допомогти визначити існування проблеми, але не дозволяє прийняти до уваги індивідуальні характеристики навігаційної задачі під час планування операцій в нових умовах та у випадку ситуативного прийняття рішень.

Базуючись на моделі трикутника Хайнриха, було висунуто гіпотезу, що зменшення кількості небезпечних дій чи станів веде до зниження імовірності аварійної ситуації. Для того щоб ідентифікувати небезпечні дії та поведінку операторів, треба оцінити їх активність безпосередньо до інциденту, та виявити ланцюжок помилок, який в кінцевому підсумку привів до інциденту.

Статистика, отримана у результаті розслідування інцидентів, не завжди є достатньою для отримання об'єктивної інформації. Тому було проведене моделювання складної навігаційної обстановки і сценаріїв, схожих на реальні інциденти, що дозволило зібрати більшу кількість статистичних даних, провести аналіз прямих і непрямих факторів, що збільшують ймовірність зіткнення та

посадки на мілину, а також відстежити ефективність заходів, спрямованих на зменшення цієї ймовірності.

Невірна оцінка ситуації, невірне маневрування, та упущення при плануванні згідно до аналізу публікацій та виконаних досліджень є основними помилками, які призводять до навігаційних інцидентів. Таким чином, основним напрямом дослідження є не підвищення безпеки за рахунок ретроспективних даних для оцінки ризику, а розробка методики планування задач та операційної оцінки ризику з урахуванням динаміки судна та навігаційних обмежень.

## РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ І МЕТОДИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### *2.1 Обґрунтування вибору теми наукового дослідження*

В результаті проведеного у першому розділі аналізу, встановлено, що досягнення комплексної ефективності роботи морських суден із одночасним гарантуванням безпеки судноплавства може бути ефективно вирішено шляхом впровадження у практичну діяльність судноводіння методів кількісної оцінки безпеки.

Для вирішення цієї задачі, по-перше, потрібно на основі аналізу статистики аварійності морського флоту виявити характерні тенденції в виникненні морських інцидентів, та за допомогою імітаційного моделювання інцидентів з участю діючих спеціалістів морського флоту, виявити та структурувати характерні помилки, які ведуть до інцидентів.

По-друге, базуючись на ідентифікованих небезпеках розробити методи оцінки якісних та кількісних ризиків виконання навігаційної задачі з використанням відповідного математичного апарату та сучасних методів комп'ютерного програмування.

Виходячи з проблеми підвищення безпеки та ефективності судноводіння за рахунок розробки теорії і методів кількісного оцінювання ризиків пов'язаних з навігаційними задачами суден, обумовлено вибір теми дисертації, яка сформульована наступним чином: «Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач».

Вирішення задачі по вказаній проблематиці вимагає розгляду наступних основних питань:

- провести декомпозицію головної задачі дисертаційного дослідження на складові, за допомогою методів системного аналізу;
- структурувати основні небезпеки, пов'язані з навігаційними інцидентами;
- дослідити принципи формалізованої оцінки безпеки;



- розробити групу аналітичних методів, які дозволяють оцінити динамічний стан судна та кінематичні та динамічні взаємозв'язки групи суден;
- розробити методи оцінки оперативних ризиків на базі динамічного стану системи судно – навігаційне середовище.
- розробити комп'ютерну програму оцінки та інформування оператора про існуючі ризики.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначає необхідність вдосконалення методів оцінки навігаційного стану навколо судна і, як результат, підвищення рівня безпеки та ефективності судноводіння.

Розв'язання вищевказаних питань містить наукову новизну дослідження.

Економічну ефективність дисертаційного дослідження складає можливе скорочення збитків від зниження рівня аварійності внаслідок запобігання навігаційним інцидентам.

Розробка теоретичної частини дисертації і її перевірка за допомогою імітаційного моделювання дають можливість реалізації запропонованого наукового дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси безпечної навігації та управління рухом засобів водного транспорту.

Предметом дослідження є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних методів управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач судноводіння.

## *2.2 Методологічні та технологічні аспекти дослідження проблеми*

Під час вибору методів рішення означеної в дисертації проблеми застосовано наступну логіку. Наукові дослідження складних проблем, до яких можна віднести і проблему, що розглядається в цієї роботі, повинні вестися з позицій системного підходу, який є міждисциплінарним науковим напрямом, що вивчає об'єкти будь-якої фізичної природи як системи.

Згідно до сучасної класифікації всі існуючі проблеми можна розділити на три класи:

- добре структуровані та кількісно сформульовані проблеми, у яких істотні залежності з'ясовані;
- неструктуровані, або якісно виражені проблеми, що містять лише опис найважливіших характеристик, ознак і ресурсів, кількісні залежності між якими невідомі;
- слабо структуровані, або змішані проблеми, які містять якісні елементи, маловідомі та невизначені сторони, які мають тенденцію домінувати.

Для вирішення добре структурованих кількісно виражених проблем використовується методологія дослідження операцій, яка полягає в побудові адекватної математичної моделі і застосуванні методів для визначення оптимальної стратегії управління цілеспрямованими діями.

Для вирішення слабо структурованих проблем використовуються методологія системного аналізу та методи теорії м'яких обчислень (генетичні алгоритми, нечітка логіка, нейронні мережі).

Проблема, що розглядається в даному дисертаційному дослідженні, як показує аналіз, приведений в першому розділі, являє собою комбінацію добре структурованою кількісно формалізованою проблеми у часті моделювання руху судна з елементами невизначеності у часті оцінки навігаційних ризиків, рішення якої вимагає використання методології дослідження операцій з залученням методів м'яких обчислень.

Рішення поставленої в дисертаційному дослідженні проблеми вимагає застосування наступних методів:

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на складові задачі;
- аналізу інцидентів, для ідентифікації та побудови моделей ризику.
- теорії динамічних багатокерованих систем, яка дозволяє описати процес судноводіння з урахуванням групи незалежних елементів, що управляють процесом, як динамічну систему;

- математичного моделювання руху судна у просторі;
- оптимізації, які використовуються для уточнення розроблених моделей на основі даних експерименту;
- математичного аналізу для знаходження кінематичних параметрів судна відносно до заданого маршруту та інших суден;
- аналітичної геометрії для розв'язання низки навігаційних задач пов'язаних з розрахунком напрямків, дистанцій та взаємного положення об'єктів;
- штучних нейронних мереж, які використані в роботі, як універсальний засіб апроксимації даних та в законах управління рухом;
- формалізованої оцінки безпеки для побудови структури метода визначення операційних ризиків.
- нечіткої логіки для формування детермінованого висновку на основі низки різнорідних даних.

На рис. 2.1. показана технологічна карта методологічного забезпечення дослідження по темі дисертації, яке забезпечує рішення головної задачі дисертаційної роботи методами системного підходу. Технологічна карта містить комплексне завдання роботи, чотири головних завдання і сім допоміжних завдань. Приведено рішення кожного із головних завдань, як і комплексного завдання роботи.

Приведемо загальну характеристику методологічного забезпечення дослідження по темі дисертації, аналізуючи його технологічну карту.

Сучасними запитами практики є підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане з гарантуванням безпеки судноплавства, при цьому витрати і заходи, спрямовані на гарантування безпеки судноплавства, повинні бути настільки малими, наскільки це не тільки теоретично, а й практично обґрунтовано.

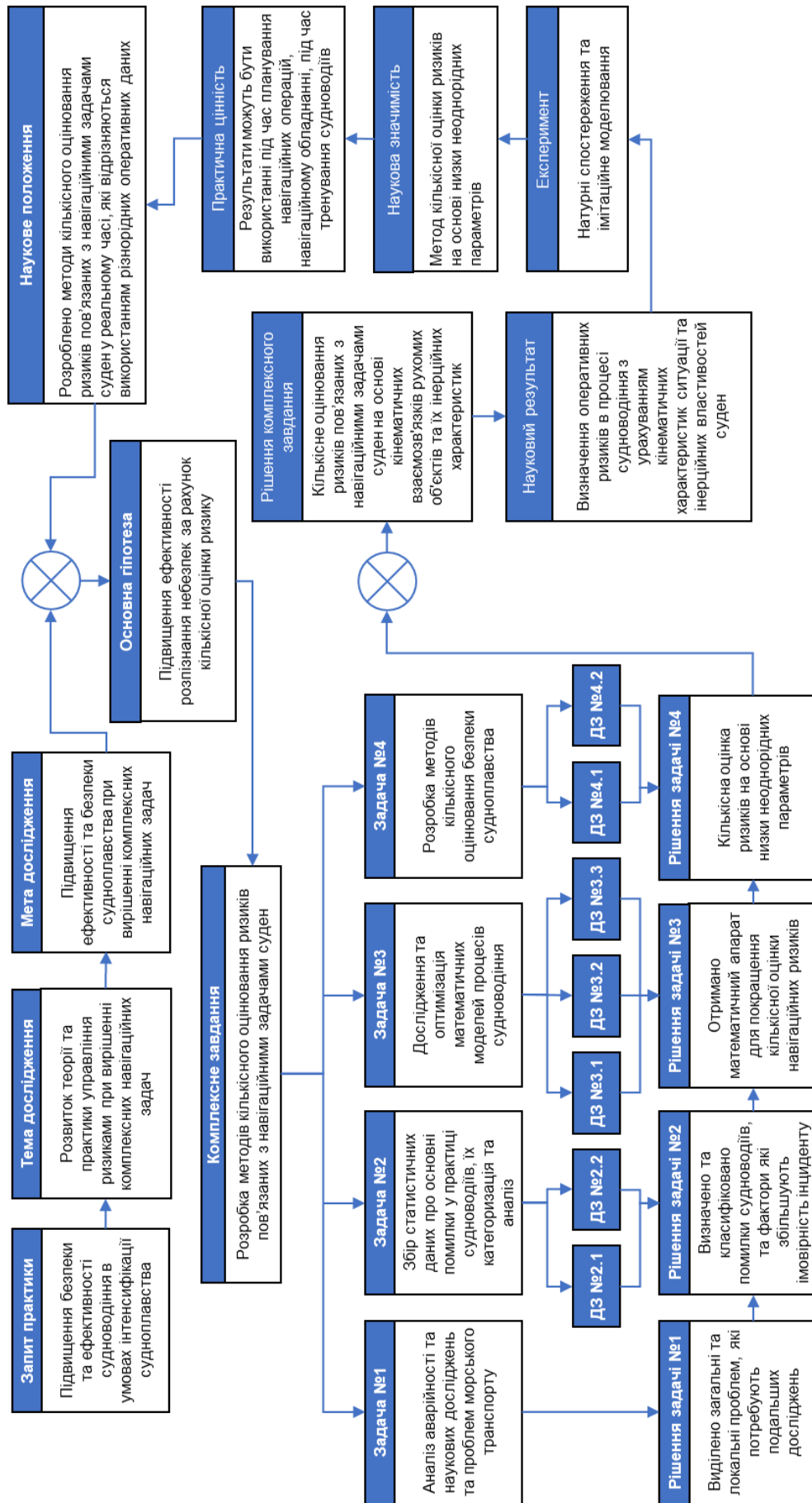


Рис. 2.1. Технологічна карта наукових досліджень

Таблиця 2.1. Допоміжні завдання

| №      | Опис допоміжного завдання                                                                                                                                                         |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ДЗ 2.1 | Збір статистичних даних про основні помилки судноводіїв, які призводять до зіткнень суден, на основі імітаційного моделювання небезпечних ситуацій, їх категоризація та аналіз    |
| ДЗ 2.2 | Збір статистичних даних про основні помилки судноводіїв, які призводять до посадки на мілину, на основі імітаційного моделювання небезпечних ситуацій, їх категоризація та аналіз |
| ДЗ 3.1 | Аналіз математичних моделей суден відносно поставленої задачі, розробка методу уточнення математичних моделей                                                                     |
| ДЗ 3.2 | Розробка допоміжних методів розрахунку динаміки окремих явищ та управління судном на траєкторії                                                                                   |
| ДЗ 3.2 | Математичне моделювання роботи групи суден, та гнучких зав'язків між суднами                                                                                                      |
| ДЗ 3.3 | Доповнення математичного апарату розходження суден рішенням зворотної задачі розходження                                                                                          |
| ДЗ 4.1 | Розробка методів кількісної оцінки навігаційних параметрів, які дозволяють отримати характеристику стану судна відносно до безпеки                                                |
| ДЗ 4.2 | Розробка методу оцінки динамічних навігаційних ризиків для судна на основі ряду неоднорідних параметрів                                                                           |

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності та безпеки судноплавства при вирішенні комплексних навігаційних задач, яка реалізується шляхом вдосконалення та впровадження запропонованих теоретичних засад управління ризиками.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про існування можливості гарантування безпеки та підвищення ефективності роботи морських суден шляхом впровадження методів кількісної оцінки безпеки.

Головна задача дослідження полягає в розробці методів кількісного оцінювання ризиків пов'язаних з навігаційними задачами суден, які враховують динамічний стан судна та характеристики навколишньої навігаційної обстановки.

Для вирішення головної задачі дисертації була виконана її декомпозиція на незалежні складові задачі, для цього були використані методи теорії дослідження операцій. Виявилось доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні складові задачі:

- аналіз аварійності, наукових досліджень та проблем морського транспорту у області формалізованої оцінки безпеки суден;
- збір статистичних даних про основні помилки у практиці судноводіїв, які призводять до навігаційних аварій (зіткнень, навалів, посадок на мілину), на основі імітаційного моделювання небезпечних ситуацій, їх категоризація та аналіз;
- дослідження та оптимізація математичних моделей процесів судноводіння, що включає: аналіз математичних моделей суден відносно поставленої задачі, розробку методів уточнення математичних моделей; розробку допоміжних методів розрахунку динаміки окремих явищ та управління судном на траєкторії; математичне моделювання роботи групи суден, та гнучких зав'язків між суднами, а також доповнення математичного апарату розходження суден рішенням зворотної задачі розходження;
- розробка методів кількісної оцінки навігаційних параметрів, які дозволяють провести попереднє планування та отримати характеристику стану судна відносно інших рухомих об'єктів, нерухомих навігаційних небезпек, та параметрів слідування завданому маршруту;
- розробка методу оцінки динамічних навігаційних ризиків для судна на основі ряду неоднорідних параметрів, що включає: визначення критеріїв безпечного стану судна; принципи нормалізації вхідних параметрів відносно до завданих критеріїв; кількісну оцінку ризиків на основі неоднорідних параметрів з урахуванням даних експертного аналізу.

Вирішення задач дисертаційного дослідження потребувало широкого залучення існуючого та розробки нового програмного забезпечення (ПЗ) а саме:

- модулі розрахунку та бібліотеки коефіцієнтів та адаптації математичних моделей руху судна (Matlab Simulink);
- модулі взаємодії суден під час розходження (Matlab Simulink);
- модуль автоматичного управління судном за заданою траєкторією з обраним автостерновим (Matlab Simulink);
- Vessel Flotation – ПЗ у середовищі Unity, розроблено для візуалізації остійності плавучого об'єкту у реальному часі, додаткове ПЗ також було розроблено у середовищі Matlab Simulink;
- Towing System – ПЗ у середовищі Matlab Simulink, призначене для швидкої симуляції небезпечних ситуацій під час роботи буксирів з судном;
- ASD Tug Simulator – *повномасштабний симулятор містку* з елементами *віртуальної реальності* взаємодії буксирів та суден у стислих водах, який дозволяє пропрацювати роботу судна та буксирів у нестандартних режимах (ескорт, непряма буксировка, гіртінг) з залученням судноводіїв;
- Voyage Planning Tool – ПЗ, розроблене на основі Microsoft Excel, основною задачею якого є оцінка безпеки запланованого маршруту судна;
- модуль оцінки операційного ризику на основі динамічних параметрів навігаційної обстановки (Matlab Simulink);
- інші допоміжні моделі і модулі (Matlab Simulink).

Прийнята наукова гіпотеза про існування можливості гарантування безпеки та підвищення ефективності роботи морських суден шляхом впровадження методів кількісної оцінки безпеки підтверджена одержаними в дисертаційній роботі теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Проведеному дисертаційному дослідженню властива практична значущість, яка полягає у тому, що його результати можуть бути одним з елементів бортових систем підтримки прийняття рішень.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи визначається тим, що отримані в роботі теоретичні результати і програми можуть застосовуватись при

плануванні навігаційних операцій, навчанні і підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Наукові результати і проведене імітаційне моделювання, отримані в дисертаційному дослідженні, визначають його наукове положення, сформульоване наступним чином:

розроблено методи кількісного оцінювання ризиків пов'язаних з навігаційними задачами суден у реальному часі, які відрізняються використанням різнорідних оперативних даних.

### *Висновки за розділом 2*

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений вибору теми дослідження і його основним напрямам. В розділі наведено характеристику методологічної структури дисертації і наведено її методологічне забезпечення.

На основі аналізу проблеми сформульовано мету та головну задачу дослідження, здійснено її декомпозицію на складові задачі. Сформульовано і підтверджено робочу гіпотезу наукового дослідження. Показано, що при вирішенні незалежних складових задач одержані відповідні наукові результати дисертаційної роботи.

У другому розділі також показані значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, а також сформульоване основне наукове положення роботи. Приведена коротка методика рішення складових задач, поставлених в роботі, причому вона описує основні етапи виконання наукового дослідження за темою дисертації та включає теоретичні розробки, розробку програмного забезпечення і проведення імітаційного комп'ютерного моделювання.



## РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СУДНА

### 3.1 Загальна характеристика і аналіз структури математичної моделі руху судна

#### 3.1.1 Загальний вид моделі руху судна

Математична модель руху судна, є модель динаміки твердого тіла на межі поділу двох середовищ. Всі зовнішні сили і моменти, що діють на судно, як показано на рис. 3.1, можуть бути розбиті на три основні категорії:

- гідродинамічні сили і моменти на корпусі, які виникають у результаті взаємодії з потоком рідини, включаючи сили ваги і плавучості;
- сили і моменти, обумовлені вітро-хвильовими збуреннями, які з'являються в результаті впливів течій, морського хвилювання і вітру;
- керуючі сили і моменти, створювані засобами управління судном.

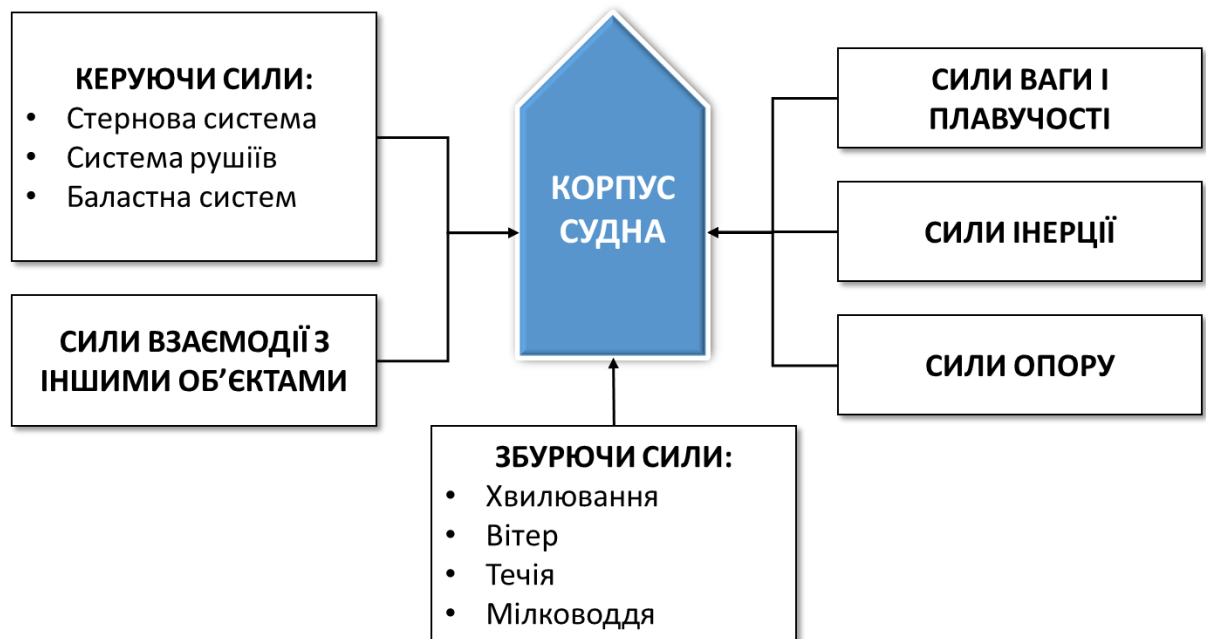


Рис. 3.1. Схема моделювання руху судна при рішенні навігаційних задач

У загальному випадку в матричній формі (векторіальне відображення Фоссена [249]) модель динаміки судна має вигляд:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = g_o + \tau_w + \tau_c$$

де  $M$  – матриця інерції системи (з урахуванням приєднаних мас);

$C(v)$  - узагальнена коріолісова доцентрова матриця (включаючи приєднані маси);

$D(v)$  – матриця тертя;

$g(\eta)$  – вектори сил та моментів ваги та плавучості;

$\tau_c$  – вектор керуючих сил і моментів;

$g_o$  – вектор керування баластом;

$\tau_w$  – вектор зовнішніх впливів;

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$  – вектор лінійних і кутових швидкостей судна;

$\eta = [x_n, y_n, z_n, \phi, \theta, \psi]^T$  – вектор позиції і орієнтації судна.

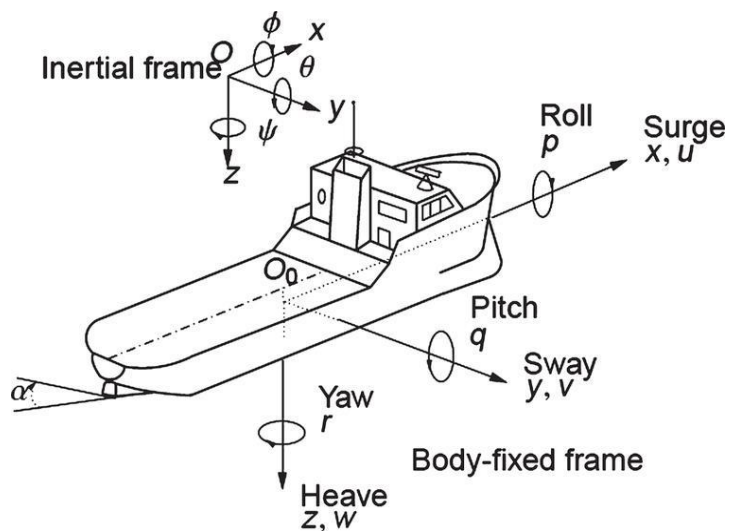


Рис. 3.2. Види руху морського надводного об'єкту

В залежності від області застосування математичні моделі руху судна можна класифікувати наступним чином:

- *лінійна модель керування курсом*, яка використовується для уточнення та адаптації алгоритмів регулювання курсу та удержання судна на траєкторії;
- *лінійна модель маневрування судна*, для діапазону швидкостей менших ніж 1 м/с для систем удержання судна в позиції;
- *нелінійна модель маневрування судна*, яка використовується для діапазону швидкостей від 1 м/с;

- *лінійна модель хитавиці судна у 6 ступенях свободи*, яка використовується для розрахунку амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) руху у лінійному діапазоні для оцінки амплітуд хитавиці, для оптимізації маршруту судна, при проектуванні каналів та фарватерів, а також при плануванні операцій судна на малих глибинах.
- *нелінійна модель хитавиці судна у 6 ступенях свободи*, яка служить для розрахунків динаміки у особливих режимах (коливання остійності, параметричний резонанс, брочинг та інших).

### 3.1.2 Системи координат

Визначимо основні системи координат, застосовані в даній роботі, при моделюванні руху судна.

**Земна базова система координат** (ЗБС або n-система)  $x_n y_n z_n$  орієнтована за основними напрямками на поверхні Землі (рис. 3.3). Початок системи координат пов'язано з деякою точкою на поверхні Землі, що належить маршрутної траєкторії судна певної щодо референц-еліпсоїда (як правило, World Geodetic System 1984) кутами широти  $\varphi_G$  і довготи  $\lambda_G$ . Система є прямокутною, при цьому вісь  $x_n$  спрямована на істинний північ, вісь  $y_n$  спрямована на схід, а вісь  $z_n$  - вниз перпендикулярно площині дотичній до поверхні Землі.

Для спрощення розрахунків передбачається, що то ширина й довжина судна щодо його переміщень у часі змінюються незначно, а, отже, n-система може вважатися інерційною, що дозволяє використовувати стосовно до неї закони Ньютона.

Пов'язана з тілом система координат (СТС або b-система)  $x_b y_b z_b$  повністю пов'язана з корпусом, переміщається і обертається разом з ним. Її центр  $O_b$  поєднується з центром тяжкості  $CG$ , якщо він знаходиться на головній площині симетрії ( $x_b z_b$ ), або будь-який інший зручною точкою, а осі збігаються з головними осями інерції. Поздовжня  $x_b$  і нормальна  $z_b$  осі лежать в поздовжній площині симетрії (діаметральній площині). Перша з них спрямована до носової частини, друга - вертикально вниз. Поперечна вісь  $y_b$  утворює з ними праву

координатну систему (рис. 3.3) і разом з поздовжньою віссю  $x_b$  розташовується в горизонтальній площині (площині палуби), а разом з вертикальною віссю  $z_b$  - в поперечній площині (площині шпангоута) судна.  $b$ -система використовується для розрахунку сил і моментів, що діють на судно.

Гідродинамічна система координат (ГСК або  $h$ -система)  $x_h y_h z_h$  жорстко не пов'язана з корпусом судна, проте рухається разом з ним по його шляху. Позитивний напрямок осі  $x_h$  збігається з осередненим курсом  $\psi_{cp}$ , вісь  $y_h$  спрямована на правий борт, вісь  $z_h$  - вниз. Площина  $x_h y_h$  збігається з поверхнею води стані покою. Центр цієї системи  $O_h$  лежить на одній вертикалі з центром тяжкості (рис. 3.3) і, як правило, на площині ватерлінії на спокійній воді. Для судна, що йде з постійними середньою швидкістю і середнім курсом (або нерухомого  $U_{cp} = 0$ ), така система координат може вважатися інерційною. ГСК використовується для розрахунку параметрів качки морських суден та інших надводних об'єктів.

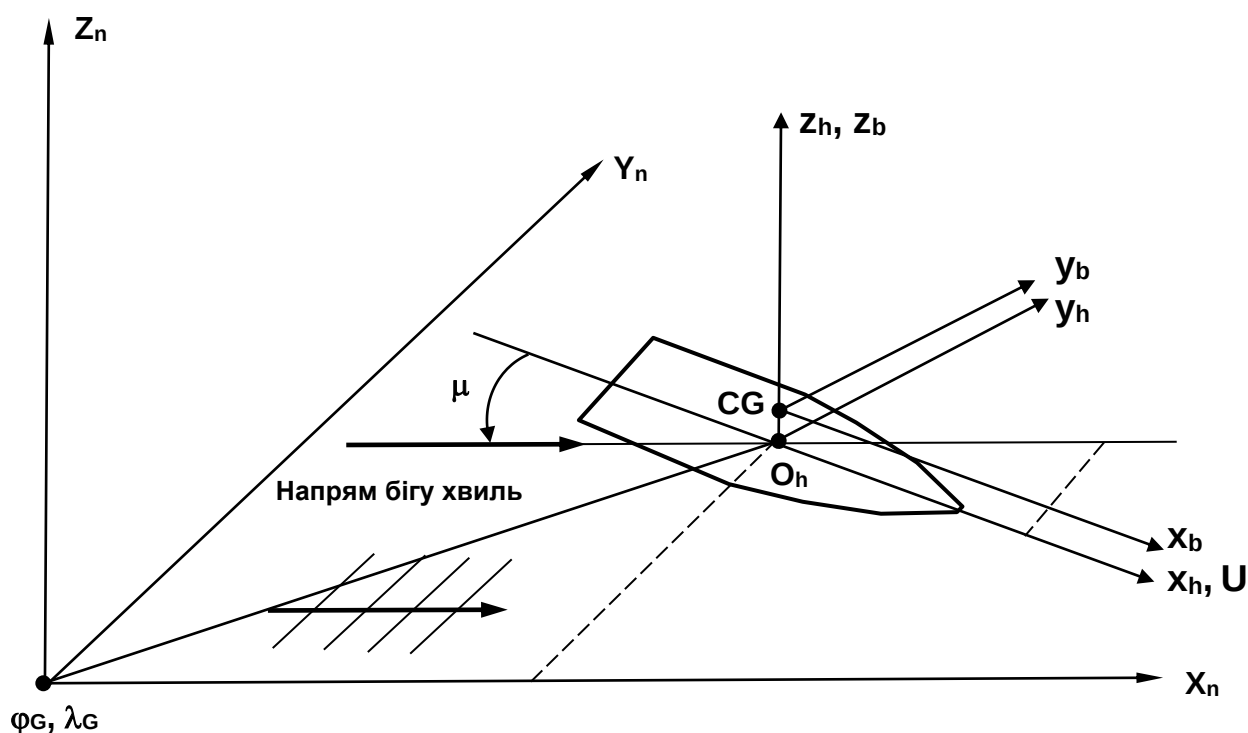


Рис. 3.3. Системи координат для моделювання хитавиці судна

Геометрична система координат (ГЕС або  $g$ -система)  $x_g y_g z_g$  жорстко пов'язана з корпусом судна і використовується для опису форми його

конструкції. Існують різні варіанти розташування початку координат і напрямку осей ГЕС, однак в даному випадку виберемо наступний: вісь  $x_g$  спрямована в ніс, вісь  $y_g$  спрямована на правий борт, вісь  $z_g$  спрямована вгору. Початок координат  $O_g$  розташовано на перетині діаметральної площини, основної площини і дотичної до крайньої точки кормової частини судна, перпендикулярної основній площині.

### 3.1.3 Перетворення кутів Ейлера

У випадку моделювання руху судна на плоскості при малих кутах кріну та диференту, відповідні координати у п-системі можна отримати поворотом системи координат відносно осі  $z_n$  та інтегруванням швидкостей:

$$U = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \quad (3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} x_n &= x_n^0 + \int U \cdot \cos\psi \\ y_n &= y_n^0 + \int U \cdot \sin\psi \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

де  $U$  – швидкість центру судна у центрі ваги,  $\psi$  - курс судна.

Для повноцінного моделювання руху судна необхідно застосовувати перетворення Ейлера до координат та швидкостей від b-системи до п-системи шляхом трьох поворотів системи координат. В цьому випадку кути Ейлера:

$\varphi$  - крін судна;

$\theta$  - диферент судна;

$\psi$  - курс судна.

Звідси, матриця трансформації Ейлера:

$$\Theta = [\varphi, \theta, \psi]^T. \quad (3.4)$$

Трансформацію швидкостей від b-системи до п-системи можна записати у вигляді:

$$v_o^n = R_b^n(\Theta) v_o^b, \quad (3.5)$$

Де матриця повороту  $R_b^n(\Theta)$  визначається як

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\theta\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\theta\sin\psi\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Зворотнє перетворення виконується наступним чином:

$$v_o^b = R_b^n(\Theta)^T v_o^n, \quad (3.7)$$

Позиція судна у п-системі виражену вектором  $\overline{pos}(x_n y_n z_n)$  у виді зручному для розрахунків на комп'ютері можна виразити як:

$$pos^n(k+1) = pos^n(k) + h R_b^n(\Theta(k)) v_o^b(k), \quad (3.8)$$

де  $h > 0$  – шаг ітерації,  $k$  – порядковий номер ітерації.

Для того щоб отримати кути Ейлера на основі кутових швидкостей у зв'язаній з тілом координатній системі (b-система)  $\omega_{nb}^b = [p, q, r]^T$  застосуємо матрицю трансформації  $T_\Theta(\Theta)$ :

$$\dot{\Theta} = T_\Theta(\Theta) \omega_{nb}^b, \quad (3.9)$$

$$T_\Theta^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3.10)$$

$$T_\Theta(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi\tan\theta & \cos\varphi\tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi/\cos\theta & \cos\varphi/\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Звідси кутові швидкості у п-системі можна отримати як:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi} &= p + q\sin\varphi\tan\theta + r\cos\varphi\tan\theta \\ \dot{\theta} &= q\cos\varphi - r\sin\varphi \\ \dot{\psi} &= q\frac{\sin\varphi}{\cos\theta} + r\frac{\cos\varphi}{\cos\theta}, \theta \neq 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

### 3.2 Математичне моделювання плоского руху судна

#### 3.2.1 Загальна форма рівнянь плоского руху судна

Моделюванню плоского руху судна присвячено велику кількість робіт вітчизняних і зарубіжних авторів. Існують як лінійні моделі, що передбачають управління курсом при постійній середній швидкості, так і нелінійні моделі, що дозволяють прорахувати динаміку судна в широкому діапазоні параметрів руху.

У літературі переважно зустрічаються моделі маневрування в трьох ступенях свободи. У першому випадку, це система рівнянь для поздовжньої і поперечної складових швидкості поступального руху і швидкості обертання відносно вертикальної осі [3, 118, 158, 219, 220], у другому випадку, це система рівнянь для швидкості поступального руху, кута дрейфу і швидкості обертання відносно вертикальної осі [268, 287].

З точки зору моделювання маневрування з урахуванням сил різної природи, таких як вітро-хвильові навантаження, течії, буксири, підрулюючі пристрої, особливо в разі розрахунків маневрування на швидкостях близьких до нуля, доцільно будувати модель з поділом швидкостей по прив'язаним до фіксованої точки судна осях.

Сили і моменти, що діють на судно, можна розрахувати на основі джерел [3, 118, 158, 268, 287].

Систему рівнянь, що описує рух судна на площині представимо як:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u}_G - (m + m_y)v_G r_G &= X \\ (m + m_y)\dot{v}_G + (m + m_x)u_G r_G &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

де  $m$  – водотоннажність судна;  $m_x$ ,  $m_y$  – приєднані маси,  $I_{kk}$ ,  $I_{zz}$  – моменти інерції,  $J_{kk}$ ,  $J_{zz}$  – приєднані моменти інерції,  $u_G$ ,  $v_G$ ,  $p_G$ ,  $r_G$  – поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості відносно поперечної і вертикальної осей відносно центру ваги судна відповідно;  $X$ ,  $Y$ ,  $K$ ,  $N$  – гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

У розгорнутому вигляді гідродинамічні сили і моменти представимо як:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P \\ N &= N_H + N_R + N_P \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

де  $H$  – корпус;  $R$  – стерно;  $P$  – гвинт;  $W$  – вітер;  $BT$  – носовий підрулюючий пристрій.

### 3.2.2 Сили і моменти, що впливають на корпус

Сили і моменти, що виражають рух на площині, прийmemo у формі, запропонованій Йошимуро [219].

Сили і момент опору води ( $X_H$ ,  $Y_H$ ,  $N_H$ ) разом з силами інерції виражаються у вигляді системи:

$$\left. \begin{aligned} X_H + m_y v_g r_g &= \left( \frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \{ X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + (X'_{rr} - x'_G m'_y) r'^2 + X'_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4 \} \\ Y_H - m_x u_g r_g &= \left( \frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \{ Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta rr} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \} \\ N_H &= \left( \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) \times \{ N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta rr} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

де  $\rho$  – щільність води,  $\beta$  – кут дрейфу, позитивний у напрямку в лівий борт;  $X_0$ ,  $X\beta\beta$ ,  $X\beta\beta\beta\beta$ ,  $X_{rr}$ ,  $X\beta_r$ ,  $Y\beta$ ,  $Y\beta\beta\beta$ ,  $Y_r$ ,  $Y_{rrr}$ ,  $Y\beta\beta_r$ ,  $Y\beta_{rr}$ ,  $N\beta$ ,  $N\beta\beta\beta$ ,  $N_r$ ,  $N_{rrr}$ ,  $N\beta\beta_r$ ,  $N\beta_{rr}$  – коефіцієнти сил опору.

Силу упору, створювану гвинтом, можна розрахувати за формулами:

$$X_P = (1 - t_P) \cdot T; \quad (3.16)$$

$$T = \rho \cdot n_P^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T(J_P); \quad (3.17)$$

$$K_T(J_P) = k_0 + k_1 \cdot J_P + k_2 \cdot J_P^2; \quad (3.18)$$

$$J_P = \frac{u(1 - w_P)}{n_P D_P}, \quad (3.19)$$

де  $T$  – упор гвинта,  $t_P$  – коефіцієнт зменшення упору,  $n_P$  – обороти гвинта,  $D_P$  – діаметр гвинта,  $K_T$  – коефіцієнт упору,  $J_P$  – ковзання гвинта,  $w_P$  – коефіцієнт впливу корпусу.

Сили і момент, створювані стерном, визначаються за формулами:



$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

де  $F_N$  – нормальна сила, створювана на стерні:  $t_R$ ,  $a_H$ ,  $x_H$  – коефіцієнти, що відображають гідродинамічну взаємодію корпусу, гвинта і стерна;  $x_R$  – відстань від площини мідель-шпангоута до балера.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_a \sin a_R, \quad (3.21)$$

де  $A_R$  – площа пера стерна,  $U_R$  – швидкість потоку води на пері стерна,  $f_a$  – підйомний коефіцієнт,  $a_R$  – кут скосу потоку води на стерні.

Коефіцієнти рівнянь (3.13) - (3.21) можуть бути визначені згідно з методиками, наведеними в [3, 118, 158, 287] або можуть бути взяті з бази даних для судна з пропорційним розміщенням.

В обох випадках необхідна подальша адаптація моделі під дані випробувань.

### 3.3 Математичне моделювання хитами судна

Застосування математичної моделі качки дозволяє спрогнозувати стан судна, оцінити амплітуди коливань у заданих умовах (наприклад, під час визначення збільшення динамічної осадки на хвилюванні при проходженні мілководдя), та визначити можливі варіанти вибору курсу та швидкості у заданих погодних умовах.

Структура математичної моделі качки судна в значній мірі залежить від вибору і розташування систем координат, в яких розраховуються сили і моменти, що діють на судно. Як правило, при моделюванні динаміки судна застосовується принцип лінійної суперпозиції, що дозволяє розглядати всі сили, що діють на судно, окремо.

Аналіз робіт [114, 226] показав, що в більшості випадків лінійна модель качки дозволяє адекватно спрогнозувати його стан. З метою більш глибокого

аналізу окремих явищ рекомендується використовувати окремі нелінійні моделі [251, 264].

Розглянемо лінійну модель качки судна, що рухається з постійною швидкістю на регулярному хвилюванні. Згідно ряду джерел [114, 226] таку модель в матричній формі, за умови, що розрахункова система координат розташована в центрі ваги  $G$ , можна отримати, спростивши модель (3.1), у вигляді:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau_w. \quad (3.22)$$

В розгорнутому виді модель (3.2) можна представити як

$$\left. \begin{aligned} (\rho\nabla + a_{11}) \cdot \ddot{x} + b_{11} \cdot \dot{x} + a_{13} \cdot \ddot{z} + b_{13} \cdot \dot{z} &= X_{w1}, \\ (\rho\nabla + a_{22}) \cdot \ddot{y} + b_{22} \cdot \dot{y} + a_{24} \cdot \ddot{\phi} + b_{24} \cdot \dot{\phi} + a_{26} \cdot \ddot{\psi} + b_{26} \cdot \dot{\psi} &= X_{w2}, \\ (\rho\nabla + a_{33}) \cdot \ddot{z} + b_{33} \cdot \dot{z} + c_{33} \cdot z + a_{35} \cdot \ddot{\theta} + b_{35} \cdot \dot{\theta} + c_{35} \cdot \theta &= X_{w3}, \\ a_{42} \cdot \ddot{y} + b_{42} \cdot \dot{y} + (I_{xx} + a_{44}) \cdot \ddot{\phi} + b_{44} \cdot \dot{\phi} + c_{44} \cdot \phi + a_{46} \cdot \ddot{\psi} + b_{46} \cdot \dot{\psi} &= X_{w4}, \\ a_{51} \cdot \ddot{x} + b_{51} \cdot \dot{x} + a_{53} \cdot \ddot{z} + b_{53} \cdot \dot{z} + c_{53} \cdot z + (I_{yy} + a_{55}) \cdot \ddot{\theta} + b_{35} \cdot \dot{\theta} + c_{35} \cdot \theta &= X_{w5}, \\ a_{62} \cdot \ddot{y} + b_{62} \cdot \dot{y} + a_{64} \cdot \ddot{\phi} + b_{64} \cdot \dot{\phi} + (I_{zz} + a_{66}) \cdot \ddot{\psi} + b_{66} \cdot \dot{\psi} &= X_{w6}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

де  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$  – коефіцієнти, що характеризують відповідно інерційні, демпфуючі і відновлюючі складові моделі;

$\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$  – кути кильової, бортової качки і рискання відповідно;

$x$ ,  $y$ ,  $z$  – поздовжні, поперечний і вертикальний рухи;

$X_{wi}$  – зовнішні сили і моменти, викликані хвилюванням;

$\nabla$  – об'ємне переміщення;

$I_{ij}$  – момент інерції.

Перевагами даної математичної моделі є наочність, універсальність і досить висока швидкість розрахунків по ній. За допомогою моделі (3.22) можна отримати прискорення, швидкості і амплітуди всіх типів хитамиці в лінійному діапазоні, як при регулярному, так і при нерегулярному хвилювання. Основним недоліком є неможливість врахувати ряд складних нелінійних явищ, таких як параметричний резонанс і зниження остійності.

Щоб врахувати нелінійний характер бортових коливань судна на хвилюванні, з метою прогнозування поведінки судна в режимах параметричного резонансу і зниження остійності, у роботі [160] запропоновано модель виду:

$$\left. \begin{aligned} (\rho\tilde{V} + a_{11}) \cdot \ddot{x} + (b_{11} + b_{11v}) \cdot \dot{x} + a_{15} \cdot \ddot{\theta} + b_{15} \cdot \dot{\theta} &= X_{w1}, \\ (\rho\tilde{V} + a_{22}) \cdot \ddot{y} + b_{22} \cdot \dot{y} + a_{24} \cdot \ddot{\phi} + b_{24} \cdot \dot{\phi} + a_{26} \cdot \ddot{\psi} + b_{26} \cdot \dot{\psi} &= X_{w2}, \\ (\rho\tilde{V} + a_{33}) \cdot \ddot{z} + b_{33} \cdot \dot{z} + c_{33} \cdot z + a_{35} \cdot \ddot{\theta} + b_{35} \cdot \dot{\theta} + c_{35} \cdot \theta &= X_{w3}, \\ a_{42} \cdot \ddot{y} + b_{42} \cdot \dot{y} + (\tilde{I}_{xx} + a_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (b_{44} + b_{44v}) \cdot \dot{\phi} + M_B(\bar{\eta}, \bar{\zeta}, z) + a_{46} \cdot \ddot{\psi} + b_{46} \cdot \dot{\psi} &= X_{w4}, \\ a_{51} \cdot \ddot{x} + b_{51} \cdot \dot{x} + a_{53} \cdot \ddot{z} + b_{53} \cdot \dot{z} + c_{53} \cdot z + (\tilde{I}_{yy} + a_{55}) \cdot \ddot{\theta} + b_{35} \cdot \dot{\theta} + c_{35} \cdot \theta &= X_{w5}, \\ a_{62} \cdot \ddot{y} + b_{62} \cdot \dot{y} + a_{64} \cdot \ddot{\phi} + b_{64} \cdot \dot{\phi} + (\tilde{I}_{zz} + a_{66}) \cdot \ddot{\psi} + b_{66} \cdot \dot{\psi} &= X_{w6} \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

де  $\tilde{V}$  - змінна об'ємна водотоннажність судна;

$\tilde{I}$  - змінні моменти інерції;

$M_B(\bar{\eta}, \bar{\zeta}, z)$  - поперечний відновлюючий момент;

$\bar{\eta}$  - вектор кутової орієнтації судна;

$\bar{\zeta}$  - вектор параметрів хвилювання.

Основною особливістю вищенаведеної моделі є залежність поперечного відновлюючого моменту від параметрів кильової і вертикальної качки, а також облік зміни конфігурації зануреної частини корпусу на хвилюванні.

Для зручності подання, відновлюючи і гідромеханічні (інерційно-демпфуючи) сили розглянемо спільно. Як відомо, в рамках лінійної теорії качки прийнято розділяти диференціальні рівняння хитавиці судна на дві незалежні групи:

- поздовжньо-горизонтальна, вертикальна і кильова качка;
- поперечно-горизонтальна, бортова хитавиця і нишпорення.

З огляду на ряд припущень, що приймаються в лінійної теорії качки, а також властивості поздовжньої симетрії судів, запишемо наступні три матриці коефіцієнтів, що входять в систему рівнянь (3.23):

- коефіцієнти інерції судна як твердого тіла:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{zx} & 0 & I_z \end{bmatrix}; \quad (3.25)$$

- потенційні коефіцієнти сил інерції:

$$M_A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & a_{26} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & a_{46} \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & a_{62} & 0 & a_{64} & 0 & a_{66} \end{bmatrix}; \quad (3.26)$$

- коефіцієнти сил потенційного демпфування:

$$D_P = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 & b_{15} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & b_{24} & 0 & b_{26} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & b_{44} & 0 & b_{46} \\ b_{51} & 0 & b_{53} & 0 & b_{55} & 0 \\ 0 & b_{62} & 0 & b_{64} & 0 & b_{66} \end{bmatrix}; \quad (3.27)$$

- коефіцієнти відновлюючих сил:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & c_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{53} & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.28)$$

Матриці (3.25)-(3.28) розраховуються з урахуванням розмірів і параметрів завантаження судна. Існує кілька варіантів розрахунку вищевказаних матриць, описаних в літературі [144, 178].

### 3.4 Уточнення моделі руху судна за результатами випробувань

Найбільшою проблемою при розробці математичної моделі руху судна, як правило, є визначення її коефіцієнтів. Загалом, без даних експерименту,

коефіцієнти моделі можна визначити за узагальненими формулами, що не завжди дозволяє отримати результат задовільної точності.

Тому, для подальшого уточнення моделі, уживають методи чисельної оптимізації [275]. Однак, коригування моделі відразу по всіх ступенях свободи може негативно позначитися на якості результатів. Більш ефективним є поетапне коригування. Наприклад, у роботі автора [163] запропоновано у першу чергу уточнювати модель хідкості, а потім всю систему рівнянь повністю.

### 3.4.1 Структура моделі хідкості судна

Рівняння поздовжнього руху судна, можна виразити наступним чином [3, 133, 118, 158, 219]:

$$(m + m_x)\dot{u}_G = X \quad (3.29)$$

де  $m$  – водотоннажність судна;  $m_x, m_y$  – приєднані маси,  $u_G$  – поздовжня складова поступальної швидкості;  $X$  – гідродинамічна сила, що діє на судно в поздовжньому напрямку.

У розгорнутому вигляді поздовжню гідродинамічну силу представимо у наступному вигляді:

$$X = X_H + X_R + X_P \quad (3.30)$$

де  $H$  – корпус;  $R$  – стерно;  $P$  – гвинт.

Коли перо стерна знаходиться в ненульовому положенні, воно впливає на швидкість судна і в даному випадку враховуватися не буде.

### 3.4.2 Сили і моменти, що впливають на корпус

Сила опору води  $X_H$  виражається наступним чином:

$$X_H = X'_0(U) \cdot \left(\frac{\rho}{2} L d U^2\right), \quad (3.31)$$

де  $\rho$  – щільність води,  $X'_0$  – коефіцієнт сили опору, діючої в поздовжньому напрямку,  $L$  – довжина судна між перпендикулярами,  $d$  – середня осадка судна,  $U$  – швидкість судна.

Силу упору, створювану гвинтом, можна розрахувати за формулою:

$$X_p = (1 - t_p) \cdot T; \quad (3.32)$$

$$T = \rho \cdot n_p^2 \cdot D_p^4 \cdot K_T(J_p); \quad (3.33)$$

$$K_T(J_p) = k_0 + k_1 \cdot J_p + k_2 \cdot J_p^2 + k_3 \cdot J_p^3; \quad (3.34)$$

$$J_p = \frac{u(1 - w_p)}{n_p D_p}, \quad (3.35)$$

де  $T$  – упор гвинта,  $t_p$  – коефіцієнт зменшення упору,  $n_p$  – обороти гвинта,  $D_p$  – діаметр гвинта,  $K_T$  – коефіцієнт упору,  $J_p$  – ковзання гвинта,  $w_p$  – коефіцієнт впливу корпусу,  $k_{0-3}$  – коефіцієнти, що апроксимуються за результатами випробувань.

Коефіцієнти рівнянь (3.32)- (3.35) можуть бути визначені згідно з методиками, наведеними в [3, 118, 287] або можуть бути взяті з бази даних для судна з пропорційним розмірами.

### 3.4.3 Моделювання та подальше коригування за результатами випробувань

Типовими маневрами при випробуваннях хідкості суден є розгін, активне і пасивне гальмування. Ці дані візьмемо зі звіту про ходові випробування контейнеровоза Maersk Sirac, 2015 року побудови, місткістю 10 000 TEU. У таблиці 3.1 наведені основні параметри даного судна.

Безпосередньо для розрахунків рівняння поступального руху по осі  $X$  можна виразити наступним чином:

$$\dot{u} = \frac{(1 - t_p) \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D_p^4 \cdot K_T(J_p) + \frac{1}{2} X_0 \cdot \rho \cdot L \cdot d \cdot U^2}{m + m_x} \quad (3.36)$$

Коефіцієнт  $X_0 = -0.014$  в даному випадку узят із розрахунків опору судна [137]. Важливо відзначити, що відсутність достовірного значення  $X_0$  значно збільшує невизначеність при уточненні інших коефіцієнтів. За відсутності експериментального значення  $X_0$  застосовуються методи розрахунку опору на тихій воді, такі як [86].

Таблиця 3.1. *Maersk Sirac* – характеристики судна

| Параметр                                           | Значення  |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Довжина найбільша, м                               | 300       |
| Довжина між перпендикулярами, $L$ , м              | 287       |
| Ширина судна, $B$ , м                              | 48.2      |
| Осадка (середня / максимальна) у вантажі, $d$ , м  | 12.5/15.0 |
| Осадка носом при випробуваннях, м                  | 4.02      |
| Осадка кормою при випробуваннях, м                 | 10.16     |
| Діаметр гвинта, $D_P$ , м                          | 9.7       |
| Коефіцієнт повноти (у баласті), $C_b$              | 0.6044    |
| Площа змоченої поверхні, $\Omega$ , м <sup>2</sup> | 11656     |
| Коефіцієнт площини мідель-шпангоута, $C_M$         | 0.9735    |
| Площа пера стерна, $A_R$ , м <sup>2</sup>          | 78.95     |

Коефіцієнти  $t_P$  та  $w_P$  можна визначити за наближеними формулами:

$$t_P = 0.325 \cdot C_b - \frac{0.1885 \cdot D_P}{\sqrt{B \cdot d}}; \quad (3.37)$$

$$w_P = 0.5C_b - 0.05. \quad (3.38)$$

Коефіцієнти при  $J_P$  апроксимуються за наявними даними випробувань гвинтів. У нашому випадку, ці дані відсутні, і у першому наближенні в результаті

розрахунків залежності швидкості судна від оборотів гвинта виходить результат, відображений на рис. 3.2-3.4.

Водночас, якщо звернути увагу на формули коефіцієнтів упору  $K_T$  і ковзання  $J_P$ , при завданні негативних обертань, коефіцієнт упору може надбати неправильне значення. Це пов'язано з тим, що ковзання буде негативним при позитивній швидкості, і, відповідно, складові рівняння (3.34) будуть відніматися з коефіцієнта  $k_0$ .

Для коректного відображення маневру на задній хід формули (3.33) і (3.35) необхідно представити у вигляді:

$$T = \rho \cdot D_P^4 \cdot K_T(J_P) \cdot n_P \cdot |n_P|; \quad (3.39)$$

$$J_P = \left| \frac{u(1 - w_P)}{n_P D_P} \right|. \quad (3.40)$$

Після підбору коефіцієнтів рівняння (3.36) методом Нелдера-Міда результат розрахунків практично збігається з експериментом, середнє відхилення від якого становить 0.26 вузла. Цільова функція, використовувана при оптимізації, має вигляд:

$$Z = \frac{\sum_{n=1}^N |U_{Tn} - U_{Sn}|}{N} \quad (3.41)$$

де  $U_T$  – швидкість, виміряна при випробуваннях,  $U_S$  – швидкість, отримана в результаті симуляції.

Однак подальший розрахунок маневрів активного та інерційного гальмування не дають задовільного результату. Це пов'язано з тим, що оптимізаційна програма коригує тільки коефіцієнт  $k_0$ , а інші коефіцієнти зменшує практично до нуля. Це в свою чергу виключає ефект ковзання гвинта з моделі. Тому для коректної оптимізації при розрахунку цільової функції необхідно враховувати відразу три маневри: розгін, інерційне гальмування і активне гальмування.

З урахуванням вищевикладеного, цільова функція (3.41) набуде вигляду:



$$\begin{aligned}
Z = w_1 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{Tn} - U_{Sn}|}{N} + w_2 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{CSTn} - U_{CSSn}|}{N} \\
+ w_3 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{ISTn} - U_{ISSn}|}{N} + w_4 \frac{\sum_{n=1}^N |D_{CSTn} - D_{CSSn}|}{N} \\
+ w_5 \frac{\sum_{n=1}^N |D_{ISTn} - D_{ISSn}|}{N}
\end{aligned} \quad (3.42)$$

де  $D$  – пройдена дистанція,  $w$  – ваговий коефіцієнт, індекс  $CS$  – активне гальмування,  $IS$  – інерційне гальмування.

Так як похибки дистанції і швидкості мають різні порядки, їх необхідно приводити до одного порядку за допомогою вагових коефіцієнтів. В даному випадку  $w = [1 \ 1 \ 1 \ 0.001 \ 0.001]$ .

У результаті повторної оптимізації уточнюються коефіцієнти  $k_1$ ,  $k_2$  і  $k_3$ , що дозволяє отримати результат задовільної точності, відображений на рис. 3.4 - 3.6 і в таблиці 3.2.

Як видно з рис. 3.4 - 3.6 параметри судна отримані розрахунковим методом до уточнення значно відрізняються від результатів експерименту. У результаті уточнення криві параметрів судна візуально співпадають з результатами експерименту, а середньо-квадратичні помилки мають допустимо низькі значення, що відображено у таблиці 3.2.

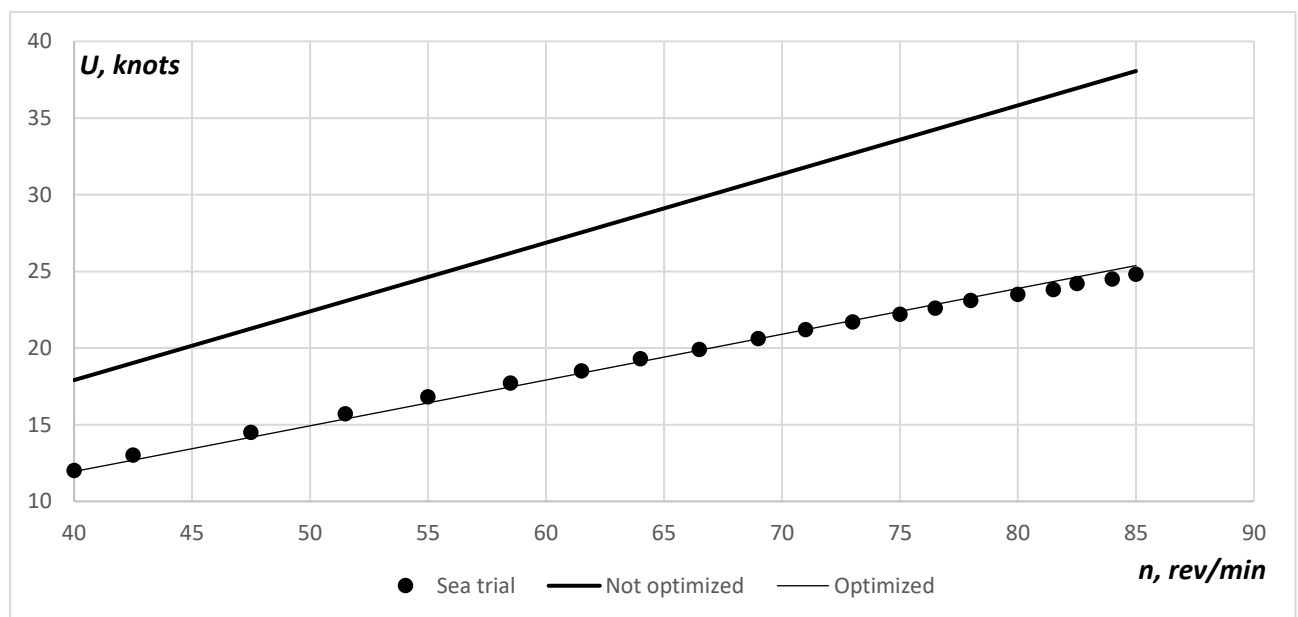


Рис. 3.4. Залежність швидкості від обертань

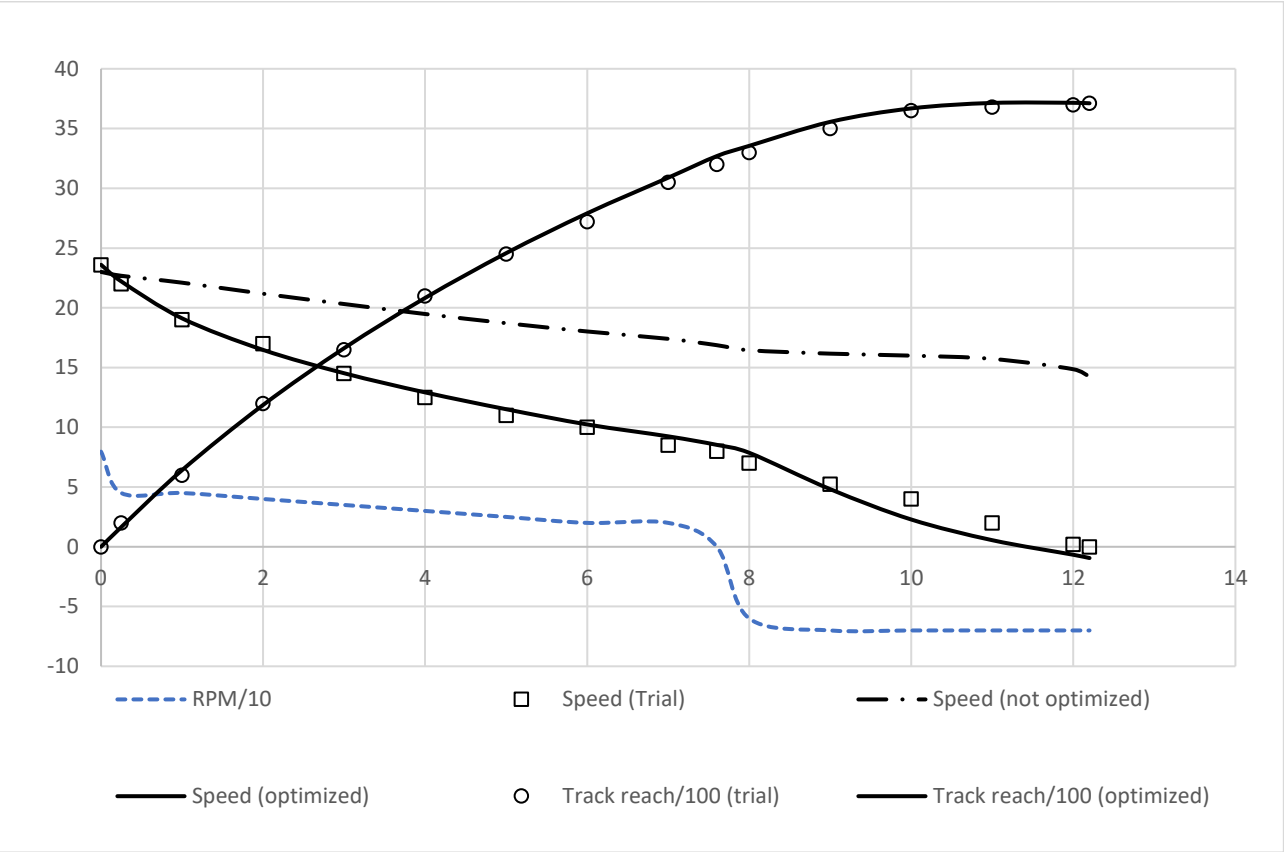


Рис. 3.5. Криві активного гальмування

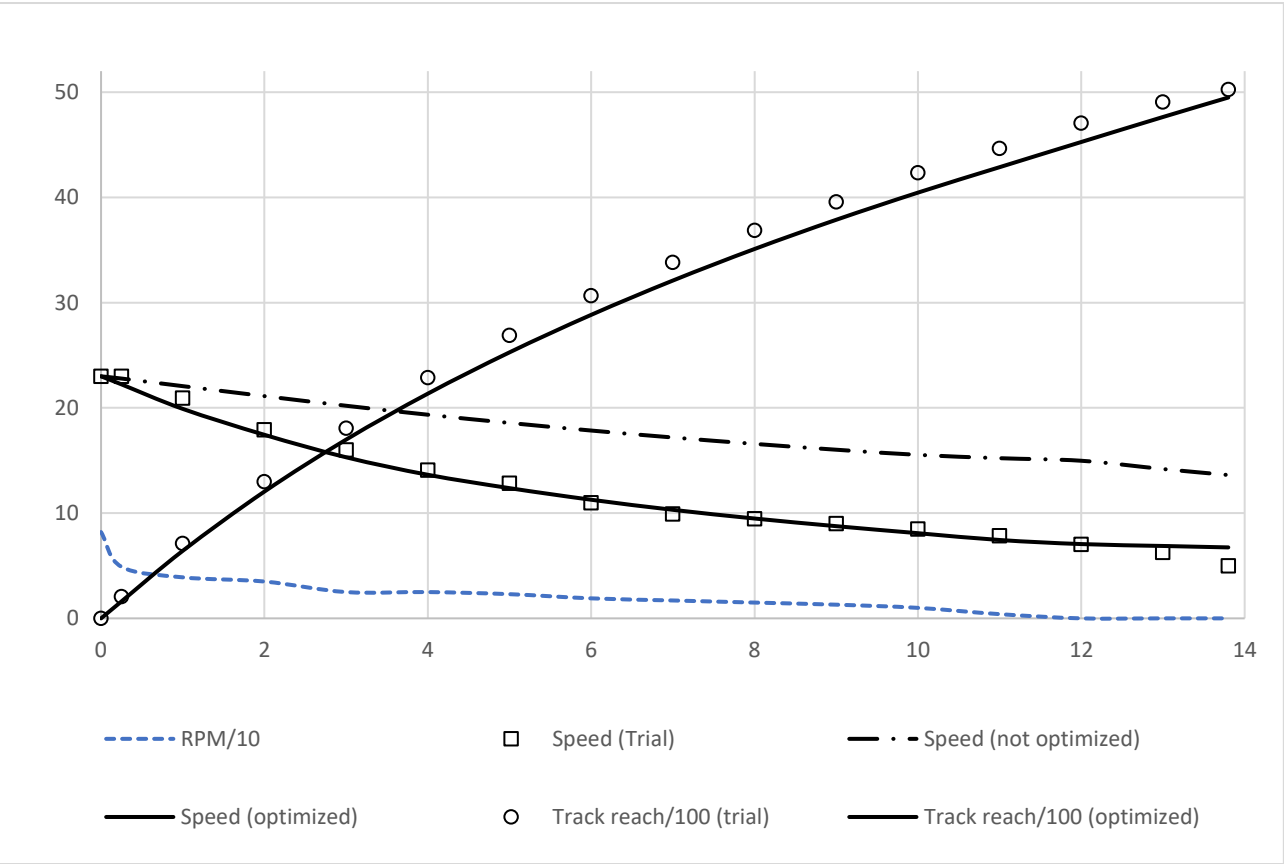


Рис. 3.6. Криві пасивного гальмування

Таблиця 3.2. Результати коригування математичної моделі

| Параметр                                                                      |        |       |       | Значення                      |        |         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------------------------------|--------|---------|-------|
| Середнє відхилення швидкості при розгоні, $\Delta_U$                          |        |       |       | 0.26 вузла                    |        |         |       |
| Середнє відхилення швидкості при активному гальмуванні, $\Delta_{UCS}$        |        |       |       | 0.59 вузла                    |        |         |       |
| Середнє відхилення швидкості при інерційному гальмуванні, $\Delta_{UIS}$      |        |       |       | 0.50 вузла                    |        |         |       |
| Відносна похибка розрахунку дистанції активного гальмування, $\Delta_{DCS}$   |        |       |       | 0.04 % / 1.0 м                |        |         |       |
| Відносна похибка розрахунку дистанції інерційного гальмування, $\Delta_{DIS}$ |        |       |       | 1.5 % / 77.1 м                |        |         |       |
| Коефіцієнти до коригування                                                    |        |       |       | Коефіцієнти після коригування |        |         |       |
| $k_0$                                                                         | $k_1$  | $k_2$ | $k_3$ | $k_0$                         | $k_1$  | $k_2$   | $k_3$ |
| 0.16                                                                          | -0.068 | 0.074 | 0.022 | 0.06104                       | 0.8632 | -1.0901 | 0.067 |

Типовими маневрами при випробуваннях суден є циркуляція, зигзаг 10/10°, активне і пасивне гальмування. Ці дані візьмемо зі звіту з випробувань Maersk Sirac [137], 2015 року побудови, місткістю 10 000 TEU. У таблиці 3.1 наведені розмірення даного судна.

Згідно з даними звіту [137] обертання гвинта в процесі циркуляції змінюються з 83 об/хв до 54 об/хв. Таким чином, для коректного розрахунку параметрів циркуляції буде доцільно на першому етапі моделювання визначити характеристики розгону і гальмування судна, що відображено в роботі [1].

Як видно з таблиці 3.1, випробування судна проводилися для стану у баласті з диферентом рівним 6.14 м і середньою осадкою 7.09 м. Експлуатаційна осадка судна в середньому в два рази більше, а диферент близький до нуля. У зв'язку з цим, розрахунок коефіцієнтів моделі за емпіричними формулами призводить до великих похибок.

На першому етапі уточнення моделі важливо визначити за якими параметрами буде оцінюватися точність отриманих результатів, і яким чином буде визначатися цільова функція.

У даному випадку, цільову функцію  $Z$  доцільно розбити на динамічну  $Z_D$  і кінематичну  $Z_K$  складові. Для маневру «циркуляція», у даних випробувань, як правило, вказується швидкість, курс і координати судна, а також висув і тактичний діаметр циркуляції. Відповідно:

$$Z_D = w_1 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{Tn} - U_{Sn}|}{N} + w_2 \frac{\sum_{n=1}^N |r_{Tn} - r_{Sn}|}{N} \quad (3.43)$$

$$Z_K = w_3 \left( \frac{\max(X_T) - \max(X_S)}{\max(X_T)} + \frac{\max(Y_T) - \max(Y_S)}{\max(Y_T)} \right) + w_4 \frac{\sum_{n=1}^N \Delta D}{N \cdot \max(X_T)} \quad (3.44)$$

$$\Delta D = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2} \quad (3.45)$$

де  $\Delta D$  – похибка позиції;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт; індекс  $T$  – дані випробувань; індекс  $S$  – дані розрахунків;  $\max(X_T)$  – позиція, що характеризує тактичний діаметр циркуляції;  $\max(Y_T)$  – позиція, що характеризує висув.

В якості окремої складової цільової функції для маневру «зигзаг» виділимо похибку визначення 1-го і 2-го кутів зарискування:

$$Z_Z = w_5 \left( \left| \frac{\Delta\psi_1^T - \Delta\psi_1^S}{\Delta\psi_1^T} \right| + \left| \frac{\Delta\psi_2^T - \Delta\psi_2^S}{\Delta\psi_2^T} \right| \right) \quad (3.46)$$

Так як похибки дистанції, лінійної і кутової швидкостей мають різні порядки, їх необхідно привести до одного порядку за допомогою вагових коефіцієнтів. В даному випадку  $w = [1; 180 \cdot 60 / \pi; 2; 1; 0.2]$ .

Звідси, цільова функція буде визначатися як:

$$Z = Z_D + Z_K + Z_Z \quad (3.47)$$

Далі слід визначити коефіцієнти, які підлягають коригуванню. В даному випадку алгоритм буде варіювати 19 коефіцієнтів, що входять в рівняння сил опору корпусу і сил, створюваних пером стерна:

$$X'_{\beta\beta}, X'_{\beta r}, X'_{rr}, X'_{\beta\beta\beta}, Y'_{\beta}, Y'_{r}, Y'_{\beta\beta\beta}, Y'_{\beta\beta r}, Y'_{\beta rr}, Y'_{rrr}, N'_{\beta}, N'_{r}, N'_{\beta\beta\beta}, N'_{\beta\beta r}, N'_{\beta rr}, N'_{rrr}, \varepsilon, \gamma_R, a_h$$

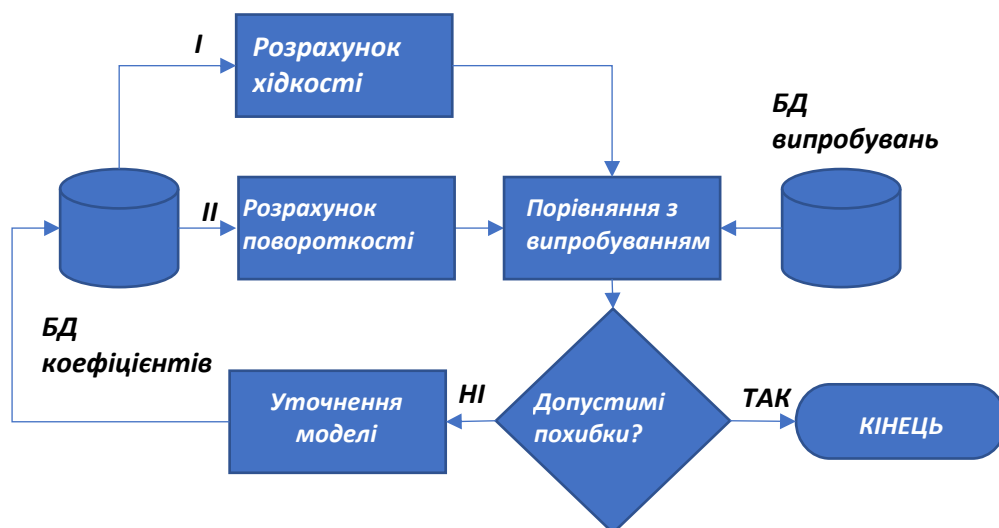


Рис. 3.7. Блок-схема алгоритму уточнення математичної моделі руху судна

На рис. 3.6 відображена блок-схема алгоритму коригування коефіцієнтів моделі руху судна. Як описано вище, першим етапом є коригування моделі хідкості. Початкові коефіцієнти моделі обираються з відповідної бази даних. Потім проводиться розрахунок за моделлю і порівняння з даними випробувань. Якщо точність моделі не відповідає заданим критеріям, проводиться коригування методом Нелдера-Міда. У результаті, уточнені коефіцієнти вносяться в базу даних.

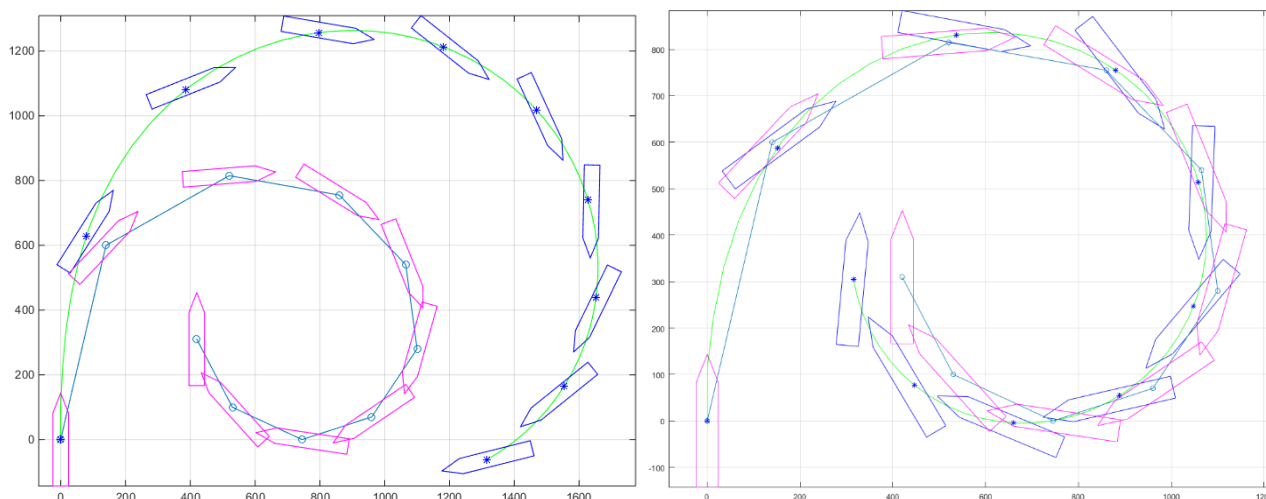


Рис. 3.8. Траєкторія циркуляції на правий борт. Зліва – до уточнення; праворуч – після уточнення; o – дані випробувань, \* – дані розрахунків

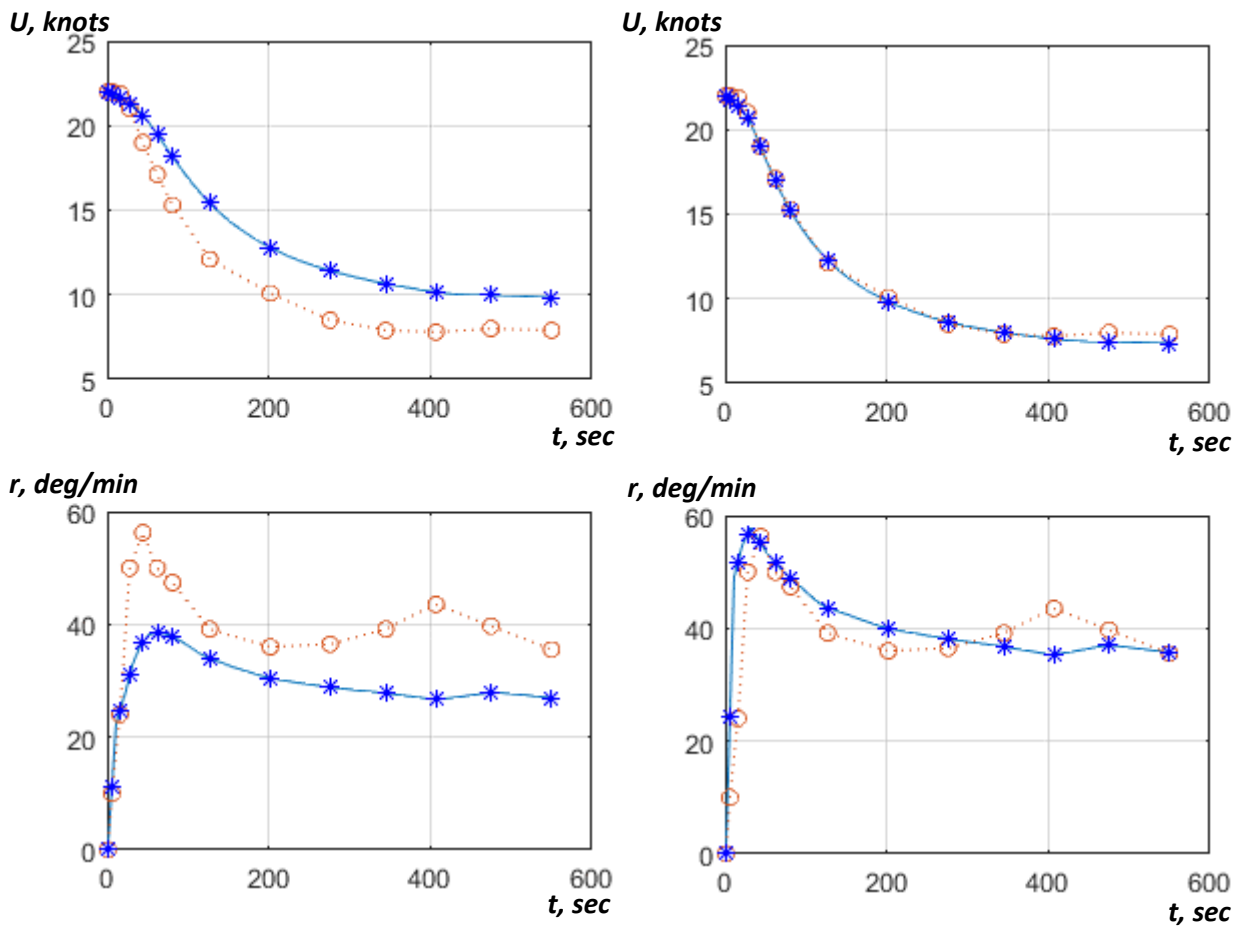


Рис. 3.9. Параметри руху при циркуляції на правий борт. Зліва – до уточнення; праворуч – після уточнення; о – дані випробувань, \* – дані розрахунків

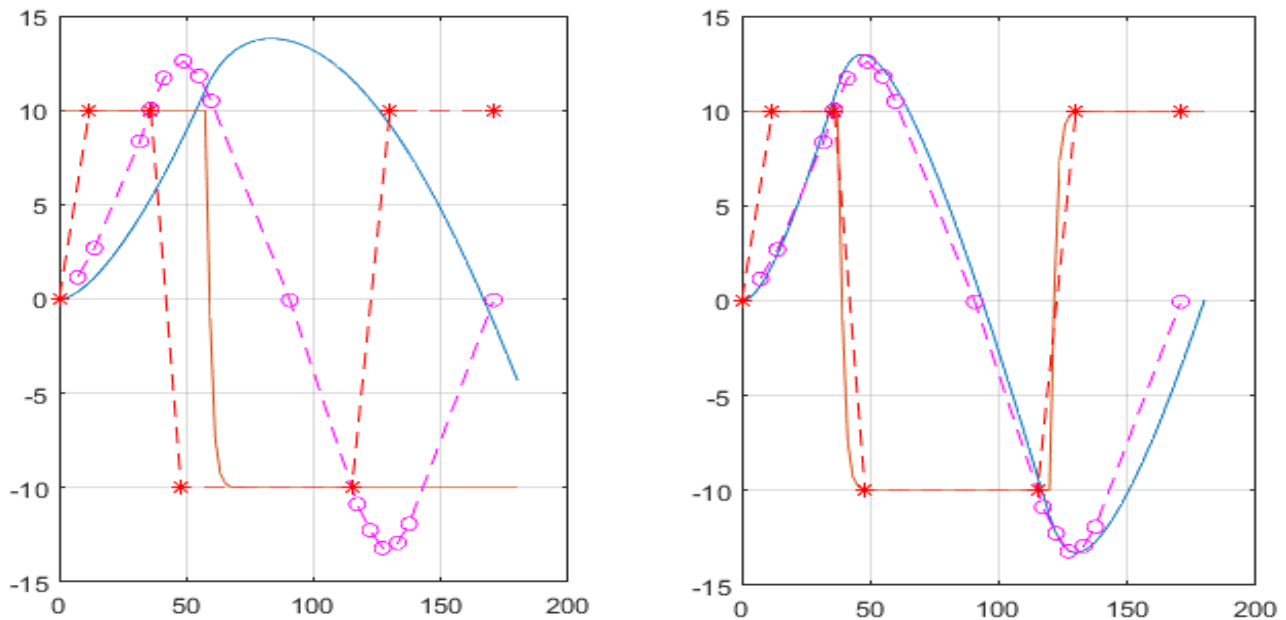


Рис. 3.10. Параметри одержування: зигзаг 10/10. Зліва – до уточнення; праворуч – після уточнення; пунктир – дані випробувань; суцільна – дані розрахунків

На рис. 3.8-3.10 і в табл. 3.4 наведені результати моделювання в першому наближенні та після коригування коефіцієнтів. Як видно, процедура коригування дозволяє істотно зменшити похибки моделювання.

Таблиця 3.3. Результати коригування математичної моделі

| Параметр                                       | Випробування   | До уточнення | Після уточнення             |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
|------------------------------------------------|----------------|--------------|-----------------------------|--------------|------------|------------------------|---------------------|-----------------|------------|--------------|----------|------------------------|---------------------|-----------------|------------|---------------|------------|--------|
| Висув, м                                       | 830.9          | 1255         | 836                         |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| Тактичний діаметр циркуляції, м                | 1164.3         | 1630         | 1148.3                      |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| 1-й кут зарискування, °                        | 2.5            | 3.8          | 3.0                         |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| 2-й кут зарискування, °                        | 3.2            | -            | 3.3                         |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| СКВ позиції                                    | -              | 589.2        | 49.9                        |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| СКВ курсу                                      | -              | 28.5         | 10                          |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| Коефіцієнти до і після коригування / різниця % |                |              |                             |              |            |                        |                     |                 |            |              |          |                        |                     |                 |            |               |            |        |
| $X'_{\beta\beta}$                              | $X'_{\beta r}$ | $X'_{rr}$    | $X'_{\beta\beta\beta\beta}$ | $Y'_{\beta}$ | $Y'_r$     | $Y'_{\beta\beta\beta}$ | $Y'_{\beta\beta r}$ | $Y'_{\beta rr}$ | $Y'_{rrr}$ | $N'_{\beta}$ | $N'_r$   | $N'_{\beta\beta\beta}$ | $N'_{\beta\beta r}$ | $N'_{\beta rr}$ | $N'_{rrr}$ | $\varepsilon$ | $\gamma_R$ | $a_h$  |
| -0.0626                                        | -0.1149        | -<br>0.00068 | 0.4182                      | 0.309<br>9   | 0.120<br>7 | 1.5816                 | 0.6323              | 0.7173          | 0.0088     | 0.0179       | -0.03025 | 0.2407                 | -0.6018             | 0.077           | -0.03      | 0.902         | 0.350      | 0.3674 |
| -0.2617                                        | -0.1531        | -<br>0.00069 | 0.47811                     | 0.104<br>4   | 0.179<br>5 | 2.7160                 | 0.9423              | 1.3620          | 0.001      | 0.0087       | -0.03    | 0.2259                 | -0.6445             | 0.109           | -0.055     | 1.344         | 0.312      | 0.3422 |
| 318                                            | 33             | 2            | 14                          | 66           | 49         | 72                     | 49                  | 90              | 89         | 52           | 4        | 6                      | 7                   | 41              | 79         | 49            | 11         | 7      |

### Висновки за розділом 3

У розділі досліджено та удосконалено низку методів математичного моделювання руху судна у просторі.

З огляду на нелінійність і багатоваріантність процесу руху судна в просторі доцільно, у залежності від поставленого конкретного навігаційного завдання, використовувати такі моделі:

- лінійна модель керування курсом, яка використовується для уточнення та адаптації алгоритмів регулювання курсу та удержання судна на траєкторії;
- лінійна модель маневрування судна, для діапазону швидкостей менших ніж 1 м/с для систем удержання судна в позиції;
- нелінійна модель маневрування судна, яка використовується для діапазону швидкостей від 1 м/с;

– лінійна модель хитавиці судна у 6 ступенях свободи, яка використовується для розрахунку амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) руху у лінійному діапазоні для оцінки амплітуд хитавиці, для оптимізації маршруту судна, при проектуванні каналів та фарватерів, а також при плануванні операцій судна на малих глибинах.

– нелінійна модель хитавиці судна у 6 ступенях свободи, яка служить для розрахунків динаміки у особливих режимах (коливання остійності, параметричний резонанс, брочинг та інших).

З метою отримання достовірних математичних моделей руху судна на основі експериментальних даних, запропоновано методику верифікації математичної моделі плаского руху судна. Модель відрізняється формою запису цільових функцій, що дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.



## РОЗДІЛ 4. ДОПОМІЖНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ

### *4.1 Моделювання остійності у реальному часі на хвилюванні*

Поведінка судна на хвилюванні значною мірою залежить від конфігурації зануреної частини корпусу. При хитавиці відбувається постійний перерозподіл тиску сил плавучості, що впливає на характер динамічних навантажень на корпус і на значення відновного моменту.

Способи розрахунку відновного моменту на хвилюванні і плечей статичної остійності досить докладно описані в роботах [228, 264, 287].

Причому найбільш повний вираз для відновного моменту наведено в [228]. Однак визначення останнього пов'язане зі значними обчислювальними труднощами. Інший, більш практичний, метод «статичної постановки судна на хвилю» [287] передбачає застосування інтегральних кривих Власова, що не завжди є зручним при програмній реалізації. Крім того, для суден малого подовження і високих чисел Фруда цей метод веде до переоцінки ступеня зниження остійності на вершині хвилі з огляду на інтерференції корабельних і набігаючих хвиль, що досить важко оцінити теоретичними методами розрахунку. У [264] запропонована регресійна залежність між приростом плеча статичної остійності, елементами хвилювання, параметрами форми корпусу і числом Фруда, яка була отримана в результаті ряду модельних випробувань суден. Ця залежність цілком реалізована програмно, проте має певні границі. Головним чином це стосується відношення довжини до ширини судна, залежність є адекватною для  $L/B = 3.2 \div 8$ . Крім того, обводи конкретного судна враховуються даною залежністю лише наближено, що може значно вплинути на адекватність отриманих результатів, особливо під час розрахунку параметричної хитавиці судна, яке має асиметричну відносно площини мідель-шпангоута форму корпусу та відчуває кильову хитавицю.

Для урахування нелінійного характеру бортової хитавиці судна на хвилюванні з метою прогнозування поведінки судна в режимах параметричного

резонансу і зменшення остійності запропонуємо наступну математичну модель хитавиці судна, розроблену на основі моделі (3.24).

Основною особливістю цієї моделі є залежність поперечного відновного моменту від параметрів кільової і вертикальної хитавиці, а також врахування зміни конфігурації зануреної частини корпусу на хвилюванні.

Значення відновного моменту  $M_B$  за довільної посадки судна на хвилюванні виразимо наступним чином:

$$M_B = g \cdot \nabla(\eta, \zeta, z) \cdot \rho \cdot l(\eta, \zeta, z). \quad (4.1)$$

де  $\nabla(\bar{\eta}, \bar{\zeta}, z), l(\bar{\eta}, \bar{\zeta}, z)$  – об'ємна водотоннажність і плече остійності судна, які залежать від посадки і положення судна на профілі хвилі;

$g$  – прискорення вільного падіння;

Плече статичної остійності  $l$  можна визначити за формулою:

$$l = y_c \cdot \cos \theta + z_c \cdot \sin \theta - z_g \sin \theta \quad (4.2)$$

де  $C(x_c, y_c, z_c)$  – центр величини зануреної частини судна;

$G(x_g, y_g, z_g)$  – центр ваги судна.

Положення центру ваги у жорстко пов'язаній із судном системі координат при одному і тому ж стані завантаження практично не змінюється. У той же час положення центру величини безпосередньо залежить від конфігурації зануреної частини корпусу. Під час хитавиці центр величини зміщується в бік нахилу судна. Таким чином, при статичній постановці задачі про остійність, знаючи положення центру величини, відновний момент завжди можна визначити.

Отже, центр величини – точка перетину трьох площин, які поділяють геометричну фігуру на чотири рівних за обсягом частини. З огляду на те, що вектор сили підтримування спрямований по нормалі до поверхні води, горизонтальна січна площина буде паралельна поверхні, вертикальна і поперечна площини – перпендикулярні до неї. Якщо кілька хвиль одночасно проходять корпус судна, горизонтальна площина паралельна площині тихої води.

Щоб знайти конфігурацію зануреної частини корпусу у відповідній напівзв'язаній системі координат, необхідно, в першу чергу, обчислити точки перетину збуреної поверхні з корпусом судна.

При посадці судна на рівний киль без крену зміна місцевої осадки на заданому хвильовому профілі можна записати як:

$$\Delta T_{\xi} = \xi_a \cdot \cos(\omega_e \cdot t - k \cdot x_b \cdot \cos \mu - k \cdot y_b \cdot \sin \mu) \quad (4.3)$$

При наявності крену  $\theta$  і диференту  $\varphi$  зміну місцевої осадки без урахування хвильового профілю можна записати як:

$$\Delta T_{\varphi} = -x_b \cdot \operatorname{tg} \varphi + y_b \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (4.4)$$

У формулах (4.3) та (4.4):

$\Delta T$  – зміна осадки;

$\xi_a$  – амплітуда хвилі;

$\omega_e$  – уявна частота хвилювання;

$\mu$  – курсовий кут хвилювання ( $0$  – у корму);

$k$  – хвильове число;

$P(x_b, y_b, z_b)$  – точка на корпусі у зв'язаній системі координат з центром у точці перетину площин мідель-шпангоута, основної та діаметральної.

Щоб визначити замкнуту криву перетину корпусу судна у довільному положенні на хвилюванні, умовно розіб'ємо корпус судна на  $M$  перерізів (зазвичай 20-30) і виразимо відповідні осадки зліва і справа для кожного перерізу у зв'язаній системі координат рівнянням:

$$T_w^{sp} - \left\{ T_{cw} - x_b \cdot \operatorname{tg} \varphi \pm y_b \cdot \operatorname{tg} \theta + \right. \\ \left. + \xi_a \cdot \cos(\omega_e \cdot t - k \cdot x_b \cdot \cos \mu \mp k \cdot y_b \cdot \sin \mu) \right\} = 0, \quad (4.5)$$

де  $T_w^s, T_w^p$  – осадки у даному перерізі на хвилюванні правим і лівим бортом;

$T_{cw}$  – осадка судна у даному перерізі на тихій воді.

У рівнянні (4.5) величина  $x_b$  задана і для кожного перерізу має фіксоване значення. Отже, (4.5) являє собою рівняння з двома невідомими  $T_w$  та  $y_b$ , вирішити яке можна тільки чисельним методом.

Щоб вирішити рівняння (4.5) за будь-яких значень осадок на перерізах, необхідно представити форму корпусу аналітично. Водночас класичний метод конформного відображення [114] може бути неефективним, так як для кожної нової осадки судна необхідно заново перераховувати відповідні коефіцієнти відображення. Найзручніше в рамках даної задачі буде отримати залежність ширини перерізу від осадки.

З метою визначення такої залежності скористаємося теорією нейронних мереж і запишемо для окремого перерізу наступну апроксимуючу залежність:

$$\left. \begin{aligned} f(z_b) &= \sum_{n=1}^N v_n \cdot th\left(\frac{z_b}{T_{cw}} \cdot w_n + b_n\right) \\ y_b &= \max(0, f(z_b)) \cdot \max(B_s/2), \quad \text{при } z_b \geq z_{fb_{min}} \\ y_b &= 0, \quad \text{при } z_b < z_{fb_{min}} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

де  $N$  – розмірність нейрона,  $n = 1, \dots, N$ , в основному,  $N = 3-5$ ;

$w, v, b$  – вагові коефіцієнти;

$H_b$  – висота борту або найвищої точки палубної надбудови в перерізі (якщо є необхідність задавати палубні конструкції, наприклад, кришки трюмів, житлову надбудову, півбак і т. д.);

$z_{min}$  – відповідне мінімальне перевищення перерізу над основною площиною.

На рис. 4.2 можна бачити результати апроксимації перерізів корпусу судна за допомогою розроблених автором методів нейронного відображення по осадці і по параметру та інших методів конформного відображення.

За допомогою залежності (4.6) знайдемо з рівняння (4.5) осадку для кожного перерізу лівим і правим бортом, користуючись градієнтним методом.

На відміну від методу описаного в попередній роботі автора [160] початкові значення осадки знаходяться з урахуванням положення точок дотику поверхні тихої води с заданим креном та диферентом. Так контур перетину задається у

виді інтерполяційних таблиць, де  $z_b = f_1(\alpha)$ ;  $y_b = f_2(\alpha)$ ,  $\alpha$  – кут між лінією проведеною із заданого центру перетину  $O^*$  до контуру судна, який змінюється від кіля в сторону борту судна (рис. 4.1).

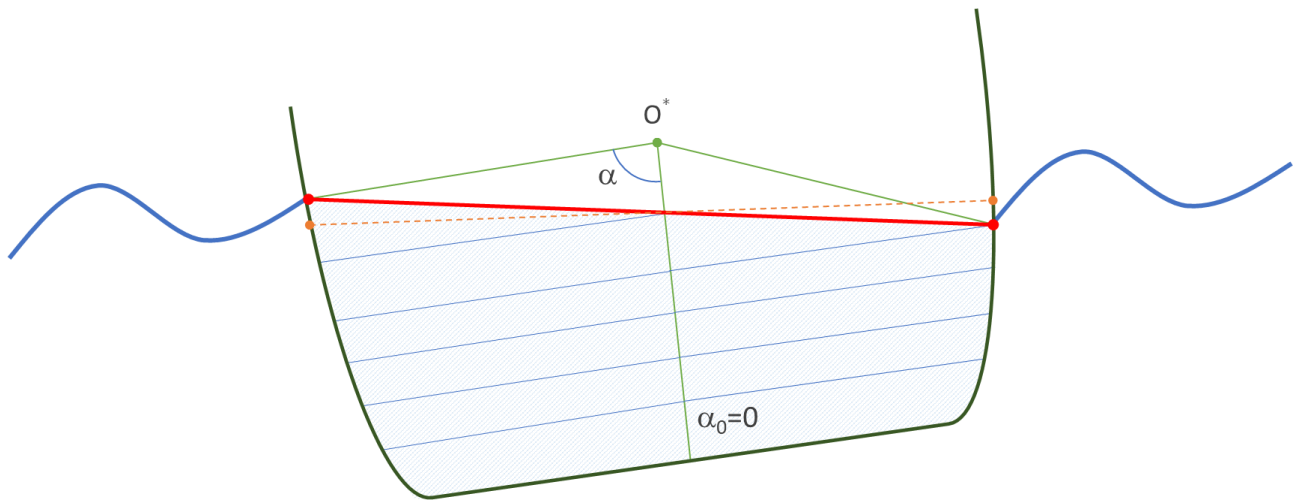


Рис. 4.1. Деякі параметри зануреного перетину корпусу судна

Відповідно осадки на рівний кіль на тихій воді правим та лівим бортом визначаються як

$$\left. \begin{aligned} T_0^s &= f_1\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ T_0^p &= f_1\left(-\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Таким чином осадки лівим та правим бортом для заданого перетину знаходяться як:

$$T_w^{sp}(j) = T_w^{sp}(j-1) + \varepsilon \cdot \text{sign}\{E(j) - E(j-1)\} \cdot E(j); \quad (4.8)$$

де  $E$  – значення помилки обчислення;

$\varepsilon$  – коефіцієнт швидкості пошуку;

$J$  – кількість ітерацій.

$$\begin{aligned} E(j) &= T_w^{sp} - \{T_{cw} - x_b \cdot \text{tg} \varphi \pm y_b \cdot \text{tg} \theta + \xi_a \\ &\cdot \cos(\omega_e \cdot t - k \cdot x_b \cdot \cos \mu \mp k \cdot y_b \cdot \sin \mu)\}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

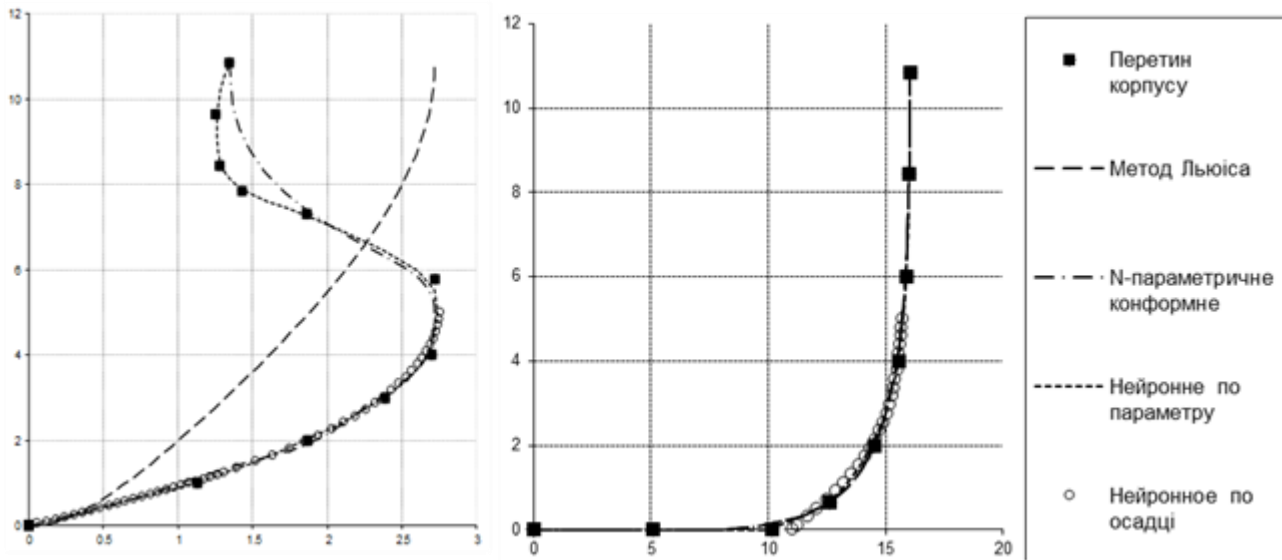


Рис. 4.2. Результати аналітичного відображення носового (ліворуч) і міделевого (праворуч) перерізу корпусу великотоннажного контейнеровоза

При  $\varepsilon = 0.5$ , збіжність рівняння (4.6) до нуля, а, отже, і значення  $T_w$ , можна отримати вже при  $j = 7..20$ .

Визначивши значення осадок лівим і правим бортом в кожному перерізі, за допомогою залежності (4.7) отримуємо простір точок зануреної частини корпусу судна на хвилюванні по перерізах у зв'язаній системі координат  $S_g = [X_g \ Y_g \ Z_g]$ . Так як січні площини необхідно розташовувати у напівзв'язаній системі координат, застосуємо для перетворення  $S_g$  наступну матрицю обертання без урахування кута рискання:

$$R_{geo} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) & -\sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) & -\sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Отримаємо відповідний простір точок у напівзв'язаній системі координат:  $S_{geo} = S_b R_{geo}$ .

Визначимо максимальні величини  $z_{max} = \max(Z_{geo})$  та  $z_{max} = \max(Z_{geo})$ , відносно яких будемо шукати відповідні січні площини.

На рис. 4.3 показана конфігурація зануреної частини корпусу судна, отримана вищеописаним способом.

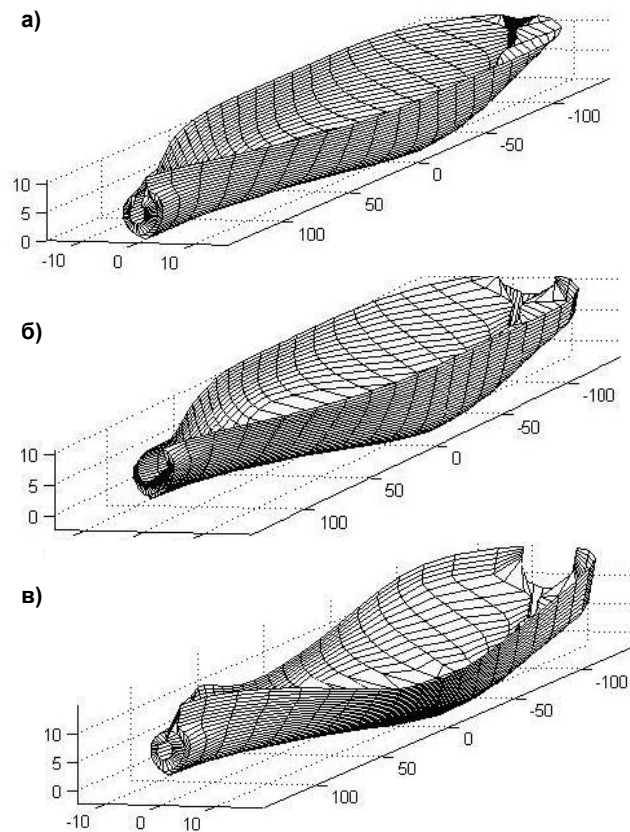


Рис. 4.3. Конфігурація підводної частини корпусу судна: а) на рівний кіль; б) при крені і диференті; в) при крені, диференті та накладенні хвильового профілю.

Подальші розрахунки зводяться до обчислення площ по перерізах, а потім і об'ємів, які відсікаються відповідними площинами фігур. На відміну від методу, описаного в роботі [160] розрахунок об'єму та площин перетинів обчисленням потрійних інтегралів (4.11) з координатами точок отриманих за допомогою залежності (4.6).

$$\begin{aligned}
 x_{CB} &= M_{yz} / V; \quad y_{CB} = M_{xz} / V; \quad z_{CB} = M_{xy} / V; \\
 V &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (y^R - y^L) \cdot dz \cdot dx; \\
 M_{yz} &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (y^R - y^L) \cdot x \cdot dz \cdot dx; \\
 M_{xz} &= \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left( (y^R)^2 - (y^L)^2 \right) \cdot dz \cdot dx; \\
 M_{xy} &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (y^R - y^L) \cdot z \cdot dz \cdot dx,
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

де  $y^R$  и  $y^L$  – ординати правого і лівого бортів відповідного перетину; СВ ( $x_{CB}, y_{CB}, z_{CB}$ ) – цетроїд зануреної частини корпусу.

Враховуючи ортогональність матриці обертання  $R_{geo}$ , отримаємо координати цетроїду у зв'язаній системі:

$$C(x_b, y_b, z_b) = C(x_{geo}, y_{geo}, z_{geo})R_{geo}^T \quad (4.12)$$

Експериментальна перевірка методу була виконана та представлена автором у роботах [160, 269]. Результати імітаційного моделювання динаміки судна з залученням описаного методу відображено на рис. 4.4 та 4.5.

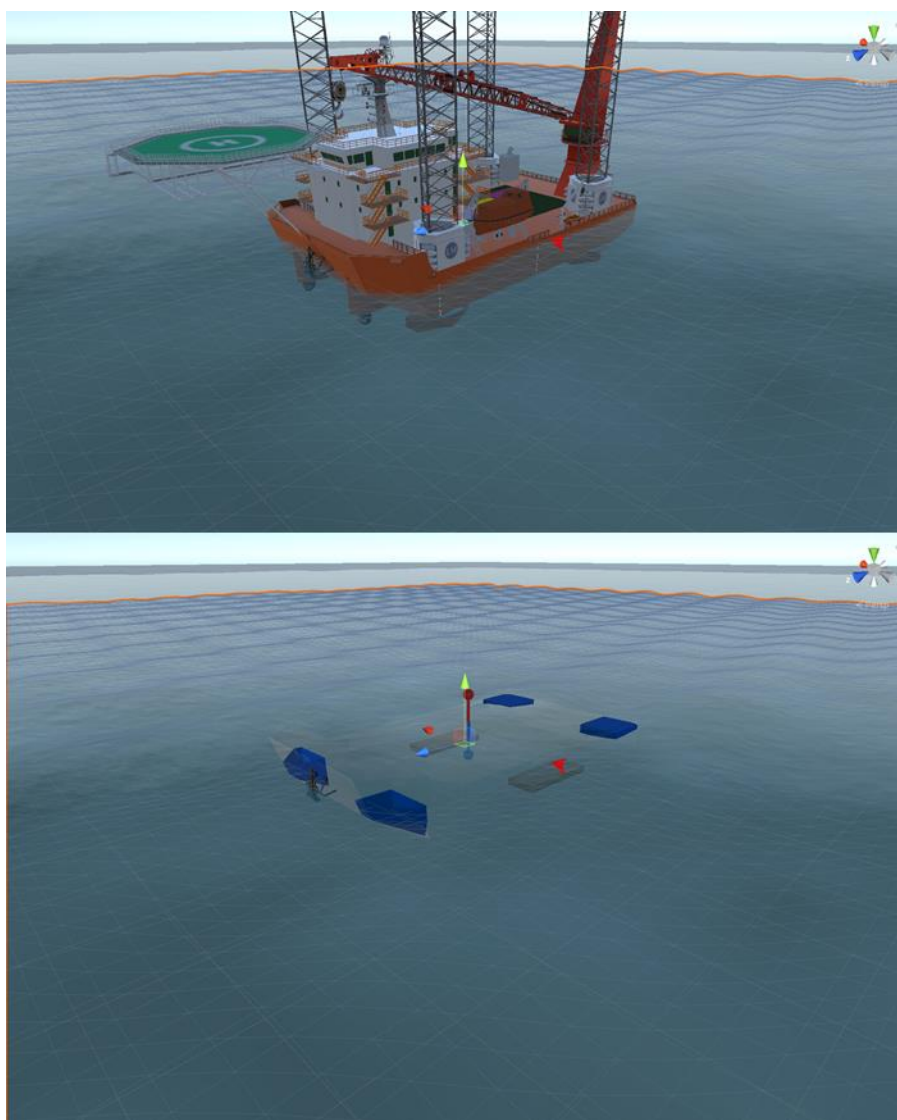


Рис. 4.4. Реалізація методу розрахунку остійності у реальному часі на програмному забезпеченні Jack-Up Barge Real-time Stability Simulator.





Рис. 4.5. Реалізація методу розрахунку остійності у реальному часі на програмному забезпеченні ASD Tug Simulator.

#### 4.2 Урахування крену судна у моделях плоского руху

Нелінійну динаміку руху судна переважно описують трьома диференційними рівняннями руху судна на площині. Однак для ряду суден з високо розташованим центром ваги, таких як контейнеровози, ро-ро та інші, важливим параметром також є крен судна на циркуляції. Останній далеко не завжди враховується.

В основному при розробці математичних моделей руху судна крен на циркуляції не враховується. Причиною є спроби спростити нелінійну модель за рахунок виключення менш значущих ступенів свободи з системи рівнянь.

Однак, згідно з дослідженнями групи японських вчених, проведеними в 2015 році в дослідному басейні [71], остійність судна і пов'язані з нею бортові нахилання значним чином впливають на параметри поворотності.

Методи визначення крену судна при повороті згадуються в роботах [67, 71, 158]. Переважно пропонується визначати кут бортового нахилання за емпіричною моделлю, отриманою в результаті експериментів в дослідному басейні. Однак в такому випадку не представляється можливим визначити крен судна на циркуляції без проведення відповідного експерименту.

У роботах [113, 287] наведені теорія і методи як побудови моделей маневрування судна, так і моделей хитавиці. У сучасній практиці розрахунків динаміки судна ці математичні моделі переважно прийнято розділяти. Водночас, в роботі [67] наведена теоретична база, яка дозволяє об'єднати в єдину систему коливальні рухи, викликані хвилюванням, і маневрування, яке має нелінійний характер.

Математична модель маневрування судна з урахуванням бортових нахилень, базуючись на моделі руху на площині з роботи [219] з додаванням рівняння коливань відносно поздовжньої осі, буде виглядати наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11})\dot{u}_G - (m + m_{22})v_G r_G &= X \\ (m + m_{22})\dot{v}_G + (m + m_{11})u_G r_G &= Y \\ (I_{44} + J_{44})\dot{p}_G &= K \\ (I_{66} + J_{66})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

де  $m$  – масова водотоннажність судна;  $m_{11}$ ,  $m_{22}$  – приєднані маси,  $I_{44}$ ,  $I_{66}$  – моменти інерції,  $J_{44}$ ,  $J_{66}$  – приєднані моменти інерції,  $u_G$ ,  $v_G$ ,  $p_G$ ,  $r_G$  – поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості відносно поперечної і вертикальної осей відносно центру ваги судна відповідно;  $X$ ,  $Y$ ,  $K$ ,  $N$  – гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

У розгорнутому вигляді гідродинамічні сили і моменти представимо як:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_W + Y_{BT} \\ K &= K_H + K_R + K_W + K_{BT} \\ N &= N_H + N_R + N_P + N_W + N_{BT} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

де  $H$  – корпус;  $R$  – стерно;  $P$  – гвинт;  $W$  – вітер;  $BT$  – носовий підрулюючий пристрій.

Сили і моменти, що виражають рух на площині, прийmemo у формі, запропонованій Йошимуро [219].

Третє рівняння (рівняння для крену судна) системи (4.14) далі будемо розглядати окремо. Коефіцієнти гідродинамічних сил на корпусі згідно з роботою [219] розраховуються напівемпіричним методом на основі апроксимації результатів випробувань в дослідному басейні без виділення впливу крену і швидкості бортових коливань в окрему групу коефіцієнтів. Таким чином, буде доцільно припустити, що вплив бортових коливань на маневреність судна на тихій воді посередньо враховано в результаті апроксимації.

На основі [113] рівняння бортових коливань запишемо як:

$$\begin{aligned} &a_{42} \cdot \dot{v}_G + b_{42} \cdot v_G + \\ &(I_{kk} + a_{44}) \dot{p}_G + b_{44} \cdot p_G + c_{44} \cdot \varphi + \\ &+ a_{46} \cdot \dot{r}_G + b_{46} \cdot r_G = K, \end{aligned} \quad (4.15)$$

де  $a$  – коефіцієнти інерційних сил;  $b$  – коефіцієнти демпфуючих сил;  $c$  – коефіцієнт відновлюючих сил,  $K$  – сумарний кренувальний момент;  $\varphi$  – кут крену; індекси 1,2,3 – відповідають лінійним переміщенням по поздовжній, поперечній і вертикальній осях; індекси 4,5,6 – відповідають обертальним рухам відносно поздовжньої (крен), поперечної (диферент) і вертикальної (рискання) осей судна.

На відміну від бортової хитавиці на хвилюванні, нахил судна під час маневру не має періодичного характеру і також, як і кутова швидкість, в процесі маневру доходить до максимуму, а потім знижується до стійкого значення.

Відповідно до роботи [113] коефіцієнти демпфуючих сил при уявній частоті хвилювання близької до нуля також дорівнюють нулю, крім коефіцієнта

$b_{46}$ , який залежить від приєднаних мас і коефіцієнта  $b_{44v}$ , який виражає нелінійне в'язкісне демпфірування.

Грунтуючись на роботі [113] коефіцієнти  $a_{42}$ ,  $a_{44}$ ,  $a_{46}$ ,  $b_{46}$  з урахуванням перетворень, пов'язаних з тим, що уявна частота хвилювання дорівнює нулю, визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} a_{42} &= m_{42} + OG \cdot m_{22}; \\ a_{44} &= m_{44} + m_{42} + OG \cdot (m_{24} + OG \cdot m_{22}); \\ a_{46} &= (m_{42} + OG \cdot m_{22}) \cdot L; \\ b_{46} &= -u \cdot (m_{42} + OG \cdot m_{22}). \end{aligned} \quad (4.16)$$

де  $m_{ii}$  – коефіцієнти приєднаних мас, які можна визначити методами, описаними в роботах [113, 219, 287];  $OG$  – довжина перпендикуляра, опущеного з центру ваги на площину ватерлінії;  $L$  – довжина судна між перпендикулярами;  $u$  – поступальна швидкість судна.

Коефіцієнт  $b_{44v}$  можна визначити методом Ікеда [92], виключивши при цьому складові, залежні від уявної частоти хвилювання:

$$b_{44v} = b_{44f}(\varphi_a, \omega_n, u) + b_{44l}(u) \quad (4.17)$$

де  $b_{44f}$  – коефіцієнт тертя,  $b_{44l}$  – підйомний коефіцієнт,  $\varphi_a$  – амплітудне значення бортової хитамиці;  $\omega_n$  – власна частота бортових коливань.

Коефіцієнти  $b_{44f}$ ,  $b_{44l}$  також залежать і від геометричних параметрів зануреної частини корпусу, однак при моделюванні в певному стані завантаження їх можна вважати постійними.

Натуральну частоту коливань визначатимемо з періоду бортової хитамиці як:

$$\omega_n = \frac{1}{T_\varphi} \quad (4.18)$$

У свою чергу період хитамиці можна визначити за емпіричною формулою ІМО, наведеною в [40]:

$$T_\varphi = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{GM}}; \quad (4.19)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \left( \frac{B}{d} \right) - 0.043 \left( \frac{L}{100} \right), \quad (4.20)$$

де  $B$  – ширина судна,  $d$  – осадка,  $GM$  – метацентрична висота.

Однак для контейнеровозів класу пост-панамакс слід використовувати формулу, рекомендовану в [262], зважаючи на наявність великих похибок при обчисленні періоду хитамиці за узагальненою формулою:

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{R^2}{g \cdot GM}} \quad (4.21)$$

де  $R$  – радіус інерції судна.

Відновлюючий момент у рівнянні (4.15) виражений як  $c_{44} \cdot \varphi$ . У свою чергу:

$$c_{44} = GM \cdot g \cdot m \quad (4.22)$$

де  $m$  – маса судна,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Формула (4.22) справедлива в лінійному діапазоні кутів крену. Для великих кутів крену ( $>15^\circ$ ) більш коректним буде розрахунок відновлюючого моменту у вигляді:

$$K_\varphi = gm \cdot l(\varphi) \quad (4.23)$$

де  $l(\varphi)$  – плече статичної остійності.

У результаті диференційне рівняння бортової хитамиці можна записати у вигляді:

$$(I_{kk} + J_{kk})\ddot{\varphi}_G = a_{42} \cdot \dot{\varphi}_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - b_{44v} \cdot \dot{\varphi}_G - c_{44} \cdot \varphi - K_R - K_H \quad (4.24)$$

де  $K_R$  – кренувальний момент під дією стернового пристрою;  $K_H$  – кренувальний гідродинамічний момент.

$$K_R = Y_R \cdot (z_G - z_R); K_H = Y_H (z_G - z_H), \quad (4.25)$$

де  $Y_R$  – бічна сила, створювана на пері стерна;  $Y_H$  – бічна сила опору руху.  $z_R$  – апліката центру ефективної площі стерна;  $z_H$  – апліката центру зануреної частини корпусу. З урахуванням останнього можна отримати результат, відображений на рис. 4.7. Про моделювання маневри циркуляції з різними

кутами перекладки стерна були отримані криві бортового нахилу судна, наведені на рис. 4.8.

су.

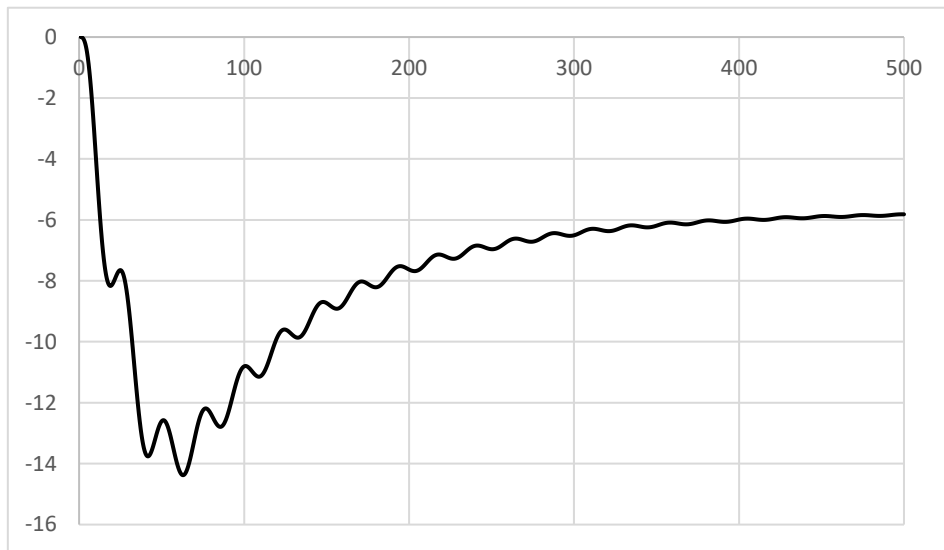


Рис. 4.6. Нахил судна  $\varphi$  (°) в повороті при перекладанні стерна  $35^\circ$ , зі змінною амплітудою коливань

Одним з аргументів функції (4.17) є амплітуда коливань  $\varphi_a$ . Так як судно не піддається хитавиці, а зазнає одноразового нахилу, фазу можна вважати рівною поточному значенню крену. У такому випадку розрахункова крива бортового нахилу в повороті буде мати виглядати, як показано на рис. 4.6.

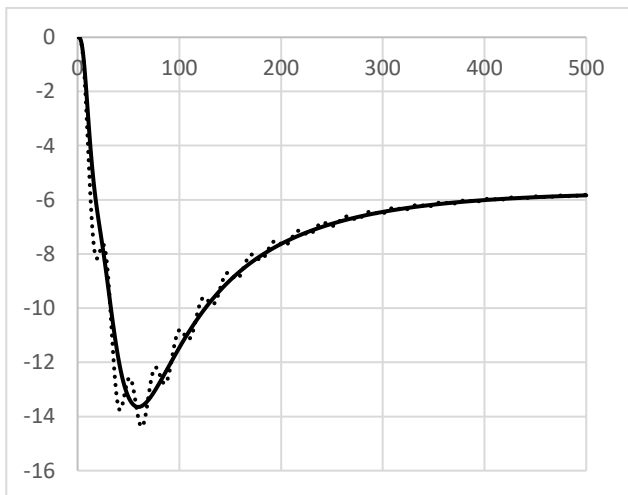


Рис. 4.7. Нахил судна  $\varphi$  (°) в повороті при перекладанні стерна  $35^\circ$ , зі фіксованою амплітудою коливань

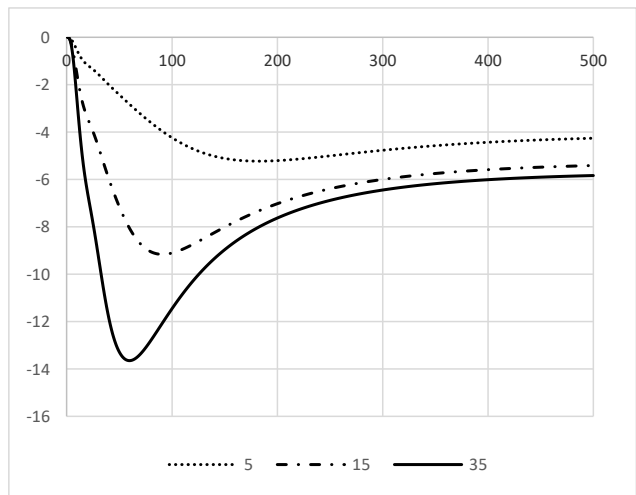


Рис. 4.8. Розрахункові криві нахилу судна в повороті, при перекладках стерна  $5^\circ$ ,  $15^\circ$  і  $35^\circ$

Однак в реальних умовах при відсутності зовнішніх збурень дана крива буде гладкою. Для того, щоб виключити коливання більш високого порядку з результатів розрахунків, присвоїмо  $\varphi_a$  фіксоване значення, рівне максимальному куту нахилення при випробуваннях, в нашому випадку  $20^\circ$ .

Розрахункові траєкторія і параметри руху контейнеровоза класу панамакс при перекладанні стерна «право на борт» з початковою швидкістю 24 вузла наведені на рис. 4.9.

У результаті проведеного дослідження був розроблений метод розрахунку крену судна на циркуляції. Було запропоновано диференційне рівняння бортових нахилень другого порядку, яке може бути додано до стандартної моделі маневрування судна на площині з метою урахування крену на циркуляції.

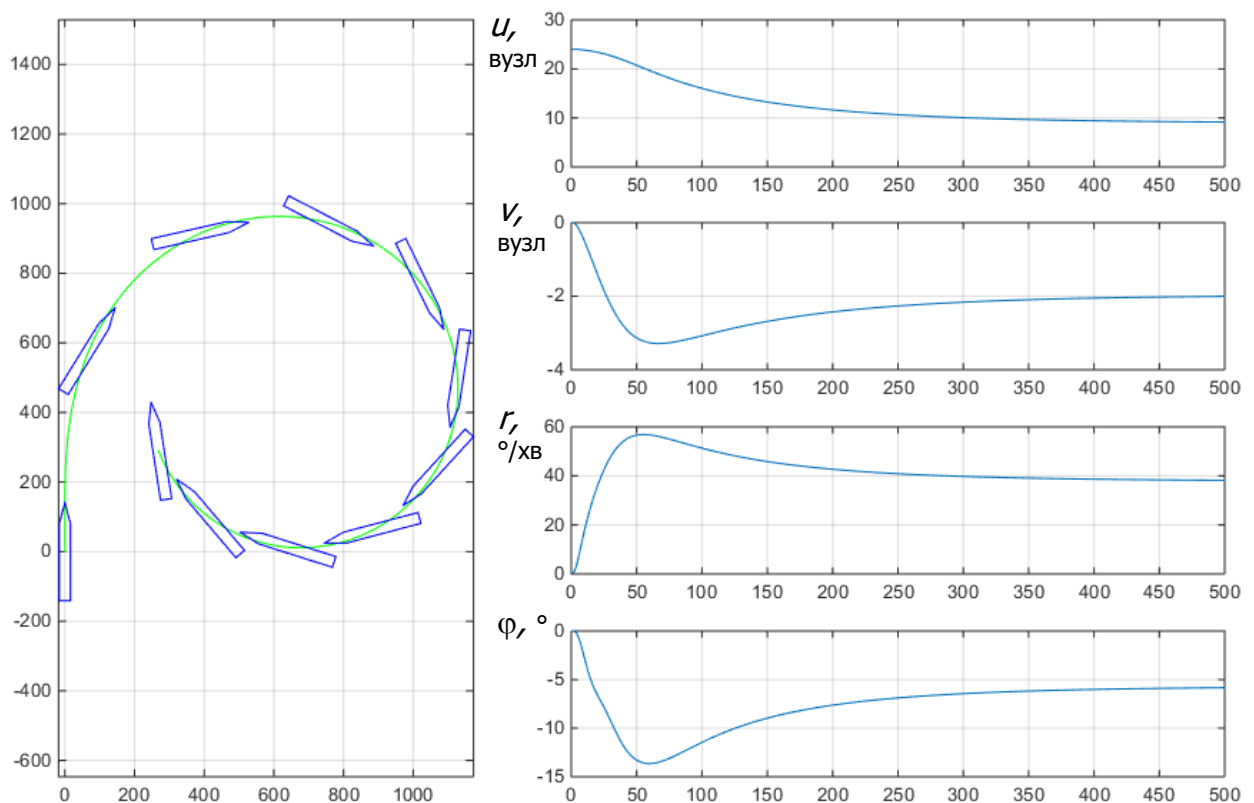


Рис. 4.9. Розрахункові параметри циркуляції контейнеровоза класу панамакс

### *4.3 Математичне моделювання систем управління судном на траєкторії*

#### *4.3.1 Загальні положення керування маневром судна на заданій траєкторії*

У теорії і практиці автоматизації судноводіння як і раніше є актуальними, вимагаючими подальших досліджень, задачі, пов'язані з удосконаленням автоматичних пристроїв і систем утримання судна на заданому курсі і заданій траєкторії руху. Особливо це стосується спеціалізованих суден (трубоукладачі, кабелеукладачі, днопоглиблювальні і сейсмічні судна), де якість роботи систем автоматичного управління оцінюється сукупністю таких показників як надійність, точність і швидкодія.

Досягнення необхідного рівня якості управління курсом і проходженням по траєкторії визначається не тільки принципами і законами, покладеними в основу синтезу математичних моделей і алгоритмів функціонування, а й способами реалізації отриманих алгоритмів. Водночас ряд способів реалізації можуть накладати обмеження, неприйнятні згідно вимог якості управління, що в свою чергу викликає необхідність перегляду законів управління, а в деяких випадках пошуку нових підходів до параметричної та структурної ідентифікації процесу управління.

Вирішення завдань ідентифікації сприятиме пошуку раціональної структури системи автоматичного руху по траєкторії (САРТ).

Дослідженню САРТ присвячено достатню кількість робіт сучасних авторів, з аналізу яких можна виділити два основних напрямки: традиційний підхід, що включає в себе дослідження ПІД-контролерів [67, 64, 236, 239, 253], та «інтелектуальний» підхід, що базується на основі теорій ШНМ (штучних нейронних мереж) і нечіткої логіки [146, 208, 240, 285, 286].

Перевагою систем, в основі яких закладений ПІД-закон регулювання, є відносна обчислювальна простота і надійність. Адаптивність управління в таких системах досягається шляхом пошуку оптимальних значень коефіцієнтів ПІД-контролера і еталонної моделі, використовуваної при фільтрації [67], у відомих



умовах. До недоліків таких САРТ відноситься протиріччя між умовами досягнення оптимальності по швидкодії і стійкості, а також притаманне всім замкнутим системам протиріччя між умовами підвищення точності в сталому динамічному режимі і стійкості.

У роботах [240, 285, 286] розглянуто проблему синтезу нейромережевого контролера в задачі управління курсом судна. Загалом застосування нейромережевого контролера дозволяє підвищити якість управління курсом, що досягається за рахунок його робастності і здатності урахування нелінійної природи об'єкта управління. Однак адаптація контролера і перевірка системи управління на стійкість вимагає значних обчислювальних витрат, що може негативно вплинути на відмовостійкість САРТ в цілому.

Робота [208] присвячена застосуванню нечіткого контролера в САРТ. Результати моделювання процесу управління судном із застосуванням такого контролера дозволяють зробити наступні висновки: нечіткий контролер дає досить гарну точність утримання судна на траєкторії в режимі стабілізації при слабких збуреннях. Однак відповідно до роботи [208] для різних режимів управління потрібні різні комбінації функцій приналежності, а адаптація контролера полягає у варіюванні тих же коефіцієнтів, що і в ПІД-регуляторі, що веде до невиправданого, в порівнянні з ПІД, ускладнення алгоритмічного апарату контролера і, як наслідок, збільшення обчислювальних витрат.

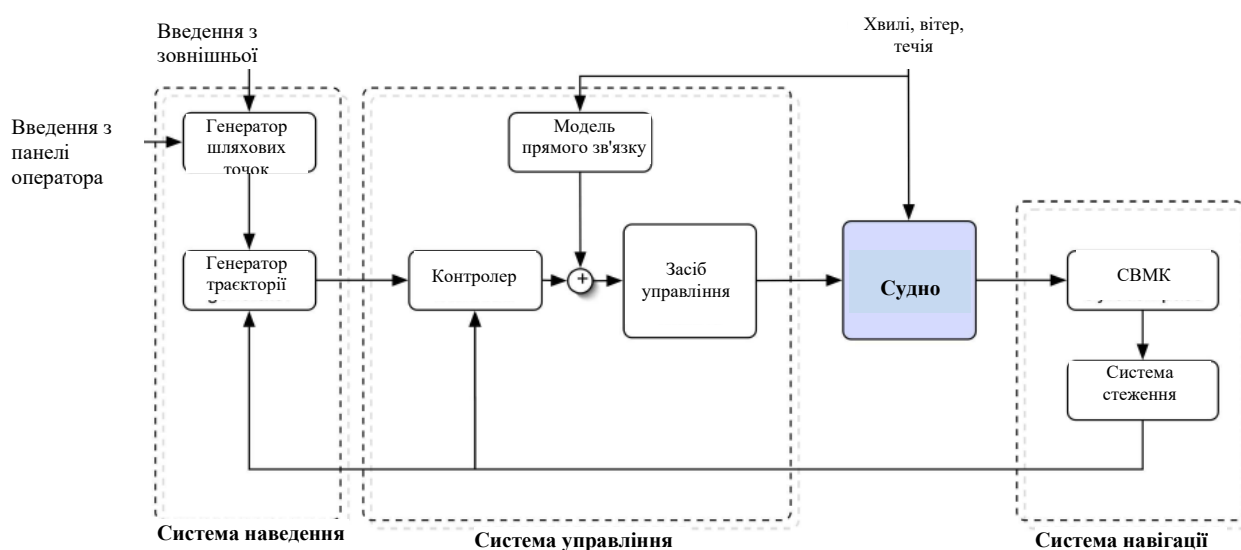


Рис. 4.10. Структурна схема САРТ

В якості вихідної розглянемо структурну схему САРТ [78], наведену на рис. 4.10. На структурній схемі зображені наступні блоки:

- *Генератор шляхових точок* відображає точки маршруту, введені в систему з панелі оператора або з зовнішнього джерела;
- *Генератор траєкторії* виробляє задану траєкторію руху судна з урахуванням його динамічних характеристик;
- *Контролер* виробляє сигнал, еквівалентний оберտальному моменту судна, на підставі двох складових: відхилення від заданого курсу і поправка, залежна від відхилення від заданої траєкторії;
- *Модель прямого зв'язку*: для випадків, коли доступні датчики вимірювання збурюючих впливів, дана модель використовується для вироблення компенсуючого сигналу, який сумується з сигналом виходу контролера і подається на виконавчий механізм засобу управління;
- *Засіб управління*: це блок, який описує реакцію засобу управління (далі стернова машина) на надхідний сигнал контролера;
- *СВПК* – система визначення позиції і курсу;
- *Система стеження* – блок прийому, обробки і фільтрації сигналів положення і курсу судна;

Таким чином, функціями САРТ є як утримання судна на курсі, так і маневрування за заданою траєкторією. При цьому, маневри, здійснювані судном в процесі експлуатації, можна розділити на наступні три групи: стабілізація, планові маневри, позапланові маневри. Виходячи з аналізу літератури [67, 78, 245] ці поняття можна визначити наступним чином:

- *Стабілізація* – утримання судна на заданому курсі.
- *Плановий маневр* – виконання маневру із заданими параметрами: швидкістю ходу, граничною кутовою швидкістю, радіусом повороту, граничною перекладкою стерна.

- *Позаплановий маневр* – значна і, в деяких випадках різка, зміна параметрів руху судна, що виконується, як правило, вручну, при необхідності уникнення безпосередньої небезпеки.

Угрупування маневрів проводилося, з урахуванням управління тільки стерном, за такими параметрами руху судна як: безрозмірна кутова швидкість  $\bar{r} = rL/U$  ( $L$  – довжина,  $U$  – швидкість судна); відношення сталої швидкості на маневрі до швидкості прямолінійного руху  $\bar{U} = U/U_0$ ; кут перекладки стерна  $\delta$ .

*Таблиця 4.1. Середні значення параметрів суден при маневруванні*

| <b>Тип маневру</b>     | <b>Безрозмірна<br/>кутова<br/>швидкість <math>\bar{r}</math></b> | <b>Відносна зміна<br/>швидкості ходу<br/><math>\bar{v}</math></b> | <b>Кут перекладки<br/>стерна <math>\delta</math>, град</b> |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Стабілізація           | 0.05                                                             | 1.0                                                               | 1-5                                                        |
| Планові маневри        | 0.3                                                              | 0.83                                                              | 5-15                                                       |
| Позапланові<br>маневри | 0.55                                                             | 0.62                                                              | > 15                                                       |

У таблиці 4.1 наведені середні значення параметрів руху, отримані за результатами аналізу маневрених характеристик ряду суден [245]. Відзначимо, що кладки стерна для забезпечення заданої кутової швидкості (або радіуса повороту) в значній мірі залежать від швидкості ходу судна. Тому поділ перекладок стерна в третьому стовпці таблиці виконано для наочності і є чисто умовним.

#### *4.3.2 Робастне управління курсом під час маневрування судна на заданій траєкторії*

Одним з ключових елементів сучасних систем управління рухом судна є автостерновий. З появою електронних карт і супутникових навігаційних систем актуальною стала проблема не тільки автоматичної стабілізації судна на курсі, а й проблема управління судном за заданою траєкторією, що передбачає виконання маневрів курсом в автоматичному режимі. У зв'язку з цим, з'являється

необхідність в розробці алгоритмів оцінки ефективності роботи та адаптації параметрів автостернового в режимі маневрування.

Питання управління курсом судна розглянуті в роботах Т. І. Фоссена [65, 67], Л.Л. Вагущенко [239], С. А. Подпоріна [285, 286] та багатьох інших авторів, з аналізу яких можна виділити два основних напрямки: традиційний підхід, що включає в себе дослідження ПД-регуляторів [65, 67], і «інтелектуальний» підхід, що базується на основі теорій ШНМ (штучних нейронних мереж) і нечіткої логіки [240, 285, 286].

Розглянемо задачу автоматизованого маневрування курсом судна, яку в загальному вигляді представимо як  $\langle O, S, \theta, U \rangle$ . Стандартна задача управління визначається ціллю управління  $O$ , класом законів управління  $U$  і сукупністю взаємозв'язків  $S$ . Взаємозв'язки тут – функціональні залежності, що дозволяють описати поведінку динамічної системи. Функціональні зв'язки визначають структуру  $S$  і параметри  $\theta$  системи. Рішення задачі управління має на увазі вибір з  $U$  закону управління  $U$ , який дозволяє досягти  $O$  при задоволенні  $S$ . Якість виконання  $O$  може бути оцінена показником ефективності  $J$ , відповідно до якого можна визначити краще рішення серед множини імовірних.

Показник ефективності  $J$  в даному випадку залежить від часу виходу на заданий курс, інтенсивності роботи стернового пристрою і точності утримання заданого курсу в режимі стабілізації.

Якщо  $J \in (0,1)$ , а  $Z \in (0,1)$  – цільова функція, що характеризує мінімум відхилень від задачі, тоді  $J = 1 - Z$ .

Для того щоб досягти максимуму ефективності для заданого об'єкта управління, необхідно визначити структуру і параметри регулятора  $\langle S_c, \theta_c \rangle$  такі, щоб  $Z$  була мінімальна. За наявності відомої структури закону управління визначення оптимальних параметрів регулятора може бути виконано як в режимі онлайн адаптації (підстроювання параметрів на основі аналізу поведінки об'єкта в реальному часі), так і офлайн адаптації (підстроювання параметрів на основі аналізу поведінки математичної моделі об'єкта).

Онлайн адаптація є прийнятною в режимі стабілізації судна на одному курсі, проте непридатна для виконання маневру через відносно швидку зміну динамічного стану об'єкта управління.

Для визначення параметрів і структури регулятора в режимі офлайн в першу чергу необхідно визначити структуру і параметри моделі об'єкта управління  $\langle S_p, \theta_p \rangle$  і моделі збурюючих впливів  $\langle S_w, \theta_w \rangle$ . При цьому обмеження і неточності моделей об'єкта і навколишнього середовища позначаються на ефективності управління загалом. Зважаючи на це, високий рівень ефективності регулювання курсу, розрахований за математичною моделлю, не завжди адекватний рівню ефективності, який досягається на реальному об'єкті. Тому важливою характеристикою регулятора також є його робастність – стійкість до неточностей у визначенні параметрів моделей об'єкта і зовнішнього середовища.

Враховуючи різноманіття станів зовнішніх збурень, стохастичну природу і значну зміну характеру їх впливу на судно при маневруванні, на ранньому етапі розробки регулятора доцільно ними знехтувати.

Підвищення ефективності управління при врахуванні збурюючих впливів при подальшій розробці та адаптації регулятора, як правило, досягаються наступними способами [65, 67]:

- введенням в закон управління інтегруючої складової;
- введенням в закон управління складової по збуренню;
- додаванням в систему управління фільтра низьких частот на виході вимірювального пристрою (гірокомпаса);
- адаптацією параметрів регулятора (в режимі стабілізації на курсі).

Класичним законом регулювання курсу судна при маневруванні є ПД-закон. Математична модель системи судно – стернова машина – ПД-регулятор може бути представлена рівняннями (4.26) - (4.30):

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K \delta + K T_3 \dot{\delta}, \quad (4.26)$$

$$\psi = \int r dt, \quad (4.27)$$

$$\Delta\psi = \psi_3 - \psi, \quad (4.28)$$

$$\delta_3 = C_p \Delta\psi + C_d r, \quad (4.29)$$

$$\delta = \int \min \left\{ \max \left\{ \frac{\delta_3 - \delta}{T_\delta}, -\dot{\delta}_{\lim} \right\}, \dot{\delta}_{\lim} \right\} dt. \quad (4.30)$$

де  $T_1, T_2, T_3, K$  – коефіцієнти моделі судна;  $r$  – кутова швидкість судна, рад/с;  $\delta$ ,  $\delta_3$  – поточний і заданий кути перекладки стерна, рад;  $\dot{\delta}_{\lim}$  – гранична швидкість перекладки стерна, рад/с;  $T_\delta$  – постійна часу стернової машини;  $\psi$ ,  $\psi_3$  – поточний і заданий курси судна, рад;  $C_p$ ,  $C_d$  – пропорційний і диференціальний коефіцієнти відповідно.

Таким чином, щоб знайти оптимальні параметри ПД-регулятора, необхідно визначити параметри моделей судна (4.26) і стернового пристрою (4.30), вид цільової функції і вид функції завдання.

За умови, що контролером можуть задаватися максимальні керуючі впливу, максимальна ефективність управління досягається при мінімумі відхилень від курсу і перекладок стерна на всьому діапазоні завдань, що може бути відображено цільовою функцією виду:

$$Z = \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{t=1}^T \left( \frac{\Delta\psi_t}{\max(|\Delta\psi_n(1, T)|)} \right)^2 + w_\delta \cdot \sum_{t=1}^T \left( \frac{\delta_t}{\max(|\delta_n(1, T)|)} \right)^2 \right] \quad (4.31)$$

де  $\Delta\psi_t$  – відхилення від заданого курсу в момент часу  $t$ ;  $\delta_t$  – відхилення пера стерна від нульового положення в момент часу  $t$ ;  $w_\delta$  – ваговий коефіцієнт;  $T$  – загальний час виконання маневру і стабілізації на заданому курсі, який обирається з урахуванням інерційних характеристик судна;  $N$  – загальна кількість завдань.

У свою чергу, функція завдання може бути представлена у формі геометричної прогресії:

$$\psi_3(n, t) = \psi_0 + \frac{\Delta\psi_n(t)}{(-1)^{n-1}}, \quad (4.32)$$

$$\Delta\psi_n = 1; n = 0,$$

$$\Delta\psi_n = 5; n = 1,$$

$$\Delta\psi_n = 2\Delta\psi_{n-1}; n \in (2, N),$$

де  $n$  – змінна, що змінюється із заданою дискретністю рівною  $T$ .

Ця функція завдання дозволяє програти на моделі маневрування з усіма найбільш характерними відхиленнями від початкового курсу. При цьому, мінімізуючи функцію (4.31) за даними моделювання, ми одержуємо коефіцієнти ПД-регулятора, оптимальні для всієї множини маневрів курсом в режимі ходу судна, для якого отримана модель (4.26).

На підтвердження вищесказаного розглянемо графіки керованості контейнеровоза серії S-175 [158], отримані з нелінійної моделі, розробленої співробітниками NTNU (Норвезький інститут науки і техніки) за даними експериментів для різних швидкостей ходу і по лінійній моделі Номото (4.26), наведені на рис. 4.5.

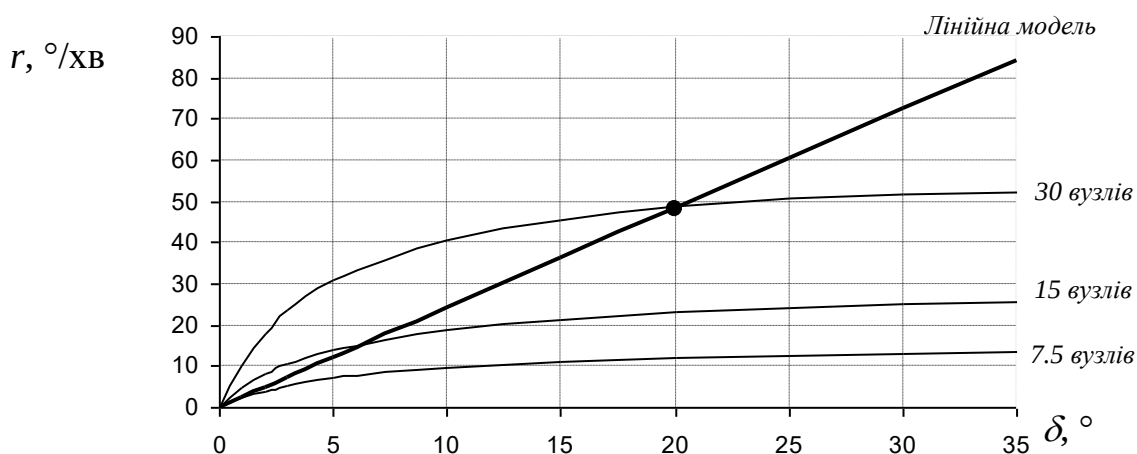


Рис. 4.11. Графік керованості контейнеровоза S-175

З рис. 4.11. видно, що значення сталої кутової швидкості при повороті для моделі (4.26) має лінійну залежність від кута перекидання стерна, в той час як для моделі NTNU кутова швидкість від кута перекидання залежить нелінійно, а її співвідношення на різних поступальних швидкостях пропорційні самим швидкостям.

Таким чином, досить точно відобразити динаміку судна на маневрі із застосуванням лінійної моделі з постійними коефіцієнтами можливо тільки для однієї швидкості ходу при перекидаках стерна до  $5-10^\circ$ .

Велика деталізація моделі судна, з іншого боку, значно ускладнює процес пошуку оптимальних коефіцієнтів закону управління і його подальшої адаптації.

Враховуючи вищевикладене, в якості моделі, використовуваної для пошуку оптимальних коефіцієнтів ПД-регулятора, в даному випадку приймемо модель (4.27), отриману в результаті апроксимації кривої зміни кутової швидкості контейнеровоза S-175 при перекидці стерна  $+20^\circ$  і швидкості ходу 30 вузлів (рис. 4.11).

Налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора зробимо відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 4.12.

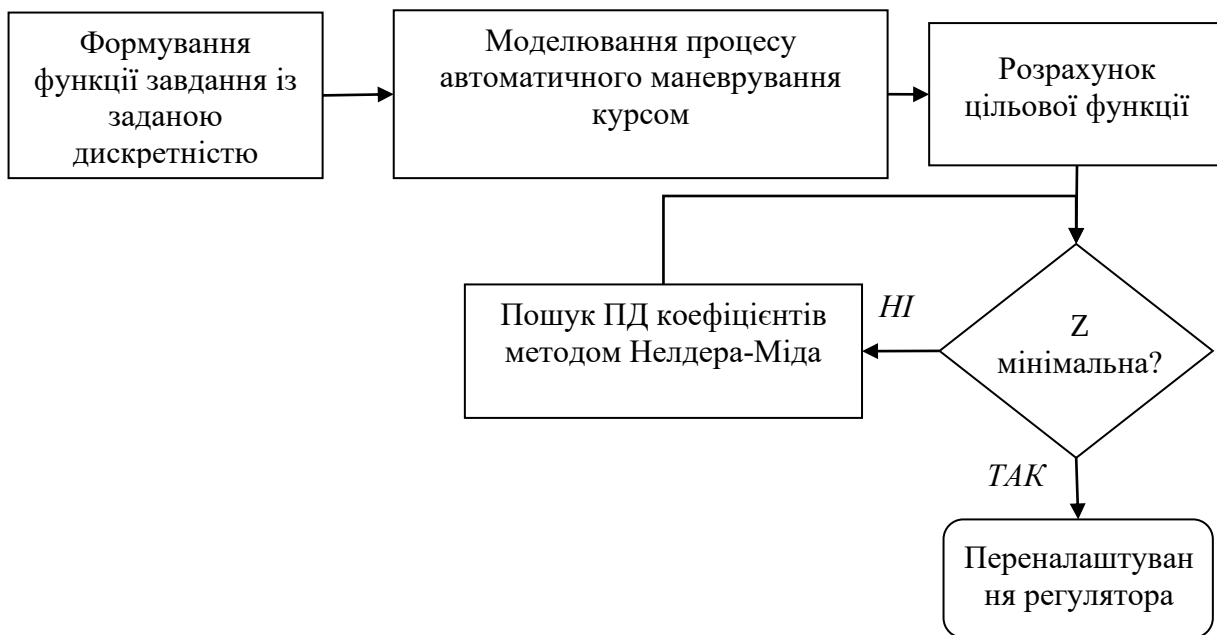


Рис. 4.12. Блок-схема алгоритму налаштування ПД-регулятора

На рис. 4.13 наведені графіки перекидачок стерна і зміни курсу контейнеровоза S-175, розраховані за моделлю NTNU і моделлю Номото (4.27) з коефіцієнтами  $T_1 = 45$ ,  $T_2 = 13$ ,  $T_3 = 115.6$ ,  $K = 0.04$  для неналаштованого ( $C_p = 1$ ,  $C_d = 1$ ) та налаштованого ( $C_p = 2$ ,  $C_d = 47$ ) ПД-регуляторів при повороті судна на  $90^\circ$  зі швидкістю 30 вузлів.



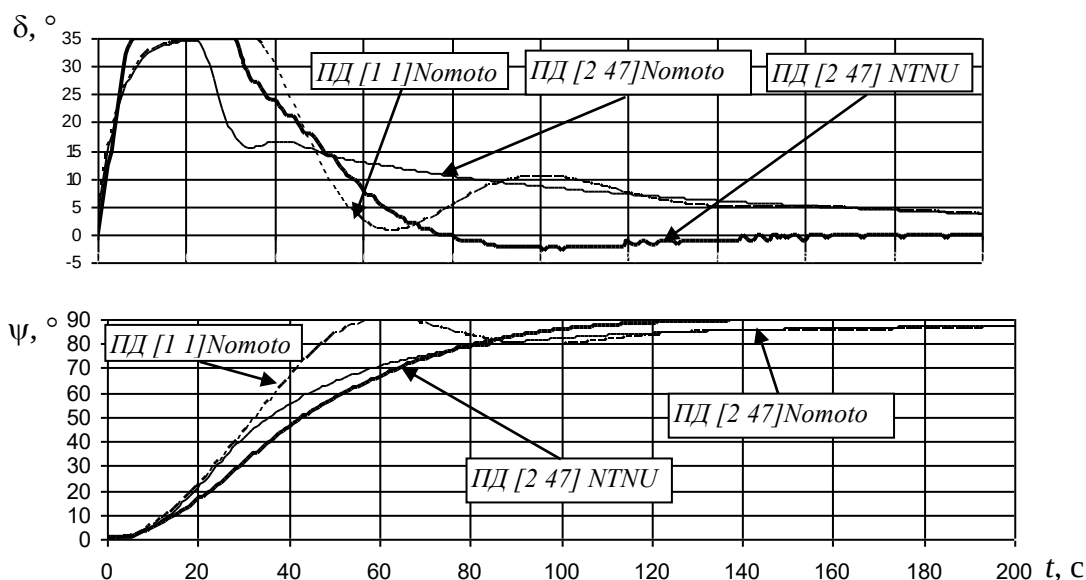


Рис. 4.13. Графіки перекладок стерна і зміни курсу контейнеровоза S-175

Як видно з графіків, незважаючи на далеко не повну відповідність лінійної моделі Номото динаміці судна при маневруванні, налаштування ПД-регулятора в офлайн режимі за запропонованим алгоритмом дозволяє отримати досить хороші результати.

У даному випадку моделювання регулювання курсу судна було проведено без урахування погодних умов і без зміни режимів ходу. Беручи до уваги значну нелінійність поведінки об'єкта управління, що очевидно з рис. 4.5, при зміні режимів ходу і характеру збурюючих впливів, для підвищення якості управління ПД-регулятор необхідно переналаштовувати.

У роботах [240, 286] показано, що застосування нейро-нечіткого підходу в якості законів управління в регуляторах курсу судна дає досить високі результати. Однак у ряді випадків регулятори мають складну структуру, а якість їх роботи сильно залежить від точності математичних моделей, що використовуються під час їх навчання [285].

Регулятор и, в основу яких закладені нейро-нечіткі алгоритми, по суті є «чорним ящиком», який погано піддається математичному аналізу та адаптації. Це обумовлено найчастіше складністю математичних моделей і великою кількістю коефіцієнтів регулятора.

Порівняльний аналіз трьох видів регуляторів: нейронного, нечіткого логічного і ПІД [277] – показав, що при забезпеченні умов робастності і стійкості найбільш перспективними в задачах регулювання курсу судна є нейронні регулятори.

У процесі розробки і тестування різних конфігурацій Н-регулятора на нелінійних математичних моделях динаміки суден різних типів і тоннажу була отримана структура, представлена на рис. 4.14.

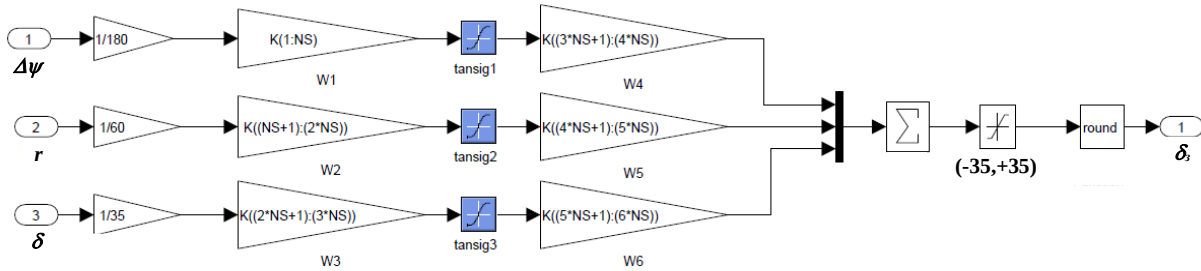


Рис. 4.14. Блок-схема Н-регулятора

Закон управління являє собою двошарову мережу прямого поширення, яка має три входи: відхилення від курсу, кутова швидкість і положення пера стерна.

Математично закон управління може бути представлений у вигляді:

$$\delta_3 = \max \left( -\partial_{lim}, \min \left( \partial_{lim}, C_P^{nn} f(\Delta\bar{\psi}) + C_D^{nn} f\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt}\right) + C_\delta^{nn} f(\bar{\delta}) \right) \right), \quad (4.33)$$

$$\left. \begin{aligned} f(\Delta\bar{\psi}) &= \sum_{i=1}^{NS} a_i^{\Delta\psi} th(\Delta\bar{\psi} \cdot b_i^{\Delta\psi}) \\ f\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt}\right) &= \sum_{i=1}^{NS} a_i^r th\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt} \cdot b_i^r\right) \\ f(\bar{\delta}) &= \sum_{i=1}^{NS} a_i^\delta th(\bar{\delta} \cdot b_i^\delta) \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

де  $\Delta\bar{\psi}$ ,  $\frac{d\bar{\psi}}{dt}$ ,  $\bar{\delta}$  – нормалізовані значення відхилення від заданого курсу, швидкості зміни відхилення та кута пера керма відповідно;  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти;  $NS$  – розмірність нейрона.

Для навчання Н-регулятора використовується той же алгоритм, що і для налаштування ПД-регулятора (рис. 4.12), однак зважаючи на кількість коефіцієнтів  $> 6$  при їх пошуку застосовується метод генетичних алгоритмів. Високих результатів навчання можна досягти вже при розмірності нейрона  $NS = 3$ , тобто при загальній кількості коефіцієнтів – 18.

З метою апробації Н-регулятора було проведено математичне моделювання динаміки контейнеровоза S-175 зі швидкостями ходу 30, 15 і 5 вузлів в трьох різних режимах управління: поворот на  $90^\circ$  при поривчастому вітрі (вітер в борт в момент виходу на курс), стабілізація при поривчастому вітрі (вітер в скулу), стабілізація при імпульсному вітровому навантаженні (вітер в скулу). Математична модель, розроблена в середовищі MatLab Simulink, наведена на рис. 4.9. Результати моделювання наведені в таблиці 4.3.

Осереднення результатів дозволило отримати наступні дані:

- дисперсія відхилень від курсу в режимі стабілізації у Н-регулятора в середньому на 60% менше, ніж у ПД-регулятора;
- дисперсія кладок стерна в режимі стабілізації у Н-регулятора в середньому на 27% більше, ніж у ПД-регулятора;
- дисперсія кладок стерна в режимі маневрування у Н-регулятора в середньому на 12% менше, ніж у ПД-регулятора;
- час виходу на курс в режимі маневрування у Н-регулятора в середньому на 60% менше, ніж у ПД-регулятора.

Таким чином, при трохи більш інтенсивній роботі стернового пристрою Н-регулятор дозволяє підвищити ефективність маневру і стабілізації на курсі більш ніж в два рази. При цьому з падінням швидкості різниця в ефективності ПД і Н-регуляторів збільшується в бік останнього.

Таблиця 4.2. Аналіз ефективності розглянутих регуляторів

| Параметри якості                                                       | Н-регулятор | ПД-регулятор [2 47] | Різниця, % |
|------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|------------|
| <i>Швидкість судна – 30 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, поворот на 90°</i> |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 11.6        | 13.6                | 15%        |
| Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, °                  | 20          | 26                  |            |
| Величина перерегулювання при маневрі, °                                | <0.5        | <0.5                |            |
| Час виходу на курс при маневрі, с                                      | 60          | 120                 | 50%        |
| <i>Швидкість судна 15 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, поворот на 90°</i>   |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 14.64       | 14.58               | -0.4%      |
| Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, °                  | 4           | 0                   |            |
| Величина перерегулювання при маневрі, °                                | <1          | -2                  |            |
| Час виходу на курс при маневрі, с                                      | 130         | 150                 | 13%        |
| <i>Швидкість судна 5 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, поворот на 90°</i>    |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 7           | 9                   | 22%        |
| Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, °                  | 16          | 0                   |            |
| Величина перерегулювання при маневрі, °                                | -2          | -7                  |            |
| Час виходу на курс при маневрі, с                                      | 250         | 250                 | 0%         |
| <i>Швидкість судна 30 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, стабілізація</i>     |             |                     |            |
| СКО відхилень від курсу, °                                             | 0.084       | 0.167               | 50%        |
| СКВ кладок стерна °                                                    | 0.597       | 0.526               | -13%       |
| <i>Швидкість судна 15 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, стабілізація</i>     |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 2.26        | 2.34                | 3%         |
| СКВ відхилень від курсу, °                                             | 0.26        | 1.20                | 78%        |
| <i>Швидкість судна 5 вузлів, Вітер 20/30 вузлів, стабілізація</i>      |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 10.41       | 6.44                | -62%       |
| СКВ відхилень від курсу, °                                             | 1.51        | 3.14                | 52%        |
| <i>Швидкість судна 30 вузлів, Порив 20 вузлів / 30 секунд</i>          |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 0.851       | 0.700               | -22%       |
| СКВ відхилень від курсу, °                                             | 0.099       | 0.1875              | 47%        |
| <i>Швидкість судна 15 вузлів, Порив 20 вузлів / 30 секунд</i>          |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна, °                                                   | 1.583       | 1.155               | -37%       |
| СКВ відхилень від курсу, °                                             | 0.143       | 0.403               | 65%        |
| <i>Швидкість судна 5 вузлів, Порив 20 вузлів / 30 секунд</i>           |             |                     |            |
| СКВ кладок стерна (під час стабілізації на курсі), °                   | 5.0         | 3.82                | -31%       |
| СКВ відхилень від курсу (під час стабілізації), °                      | 0.530       | 1.67                | 68%        |

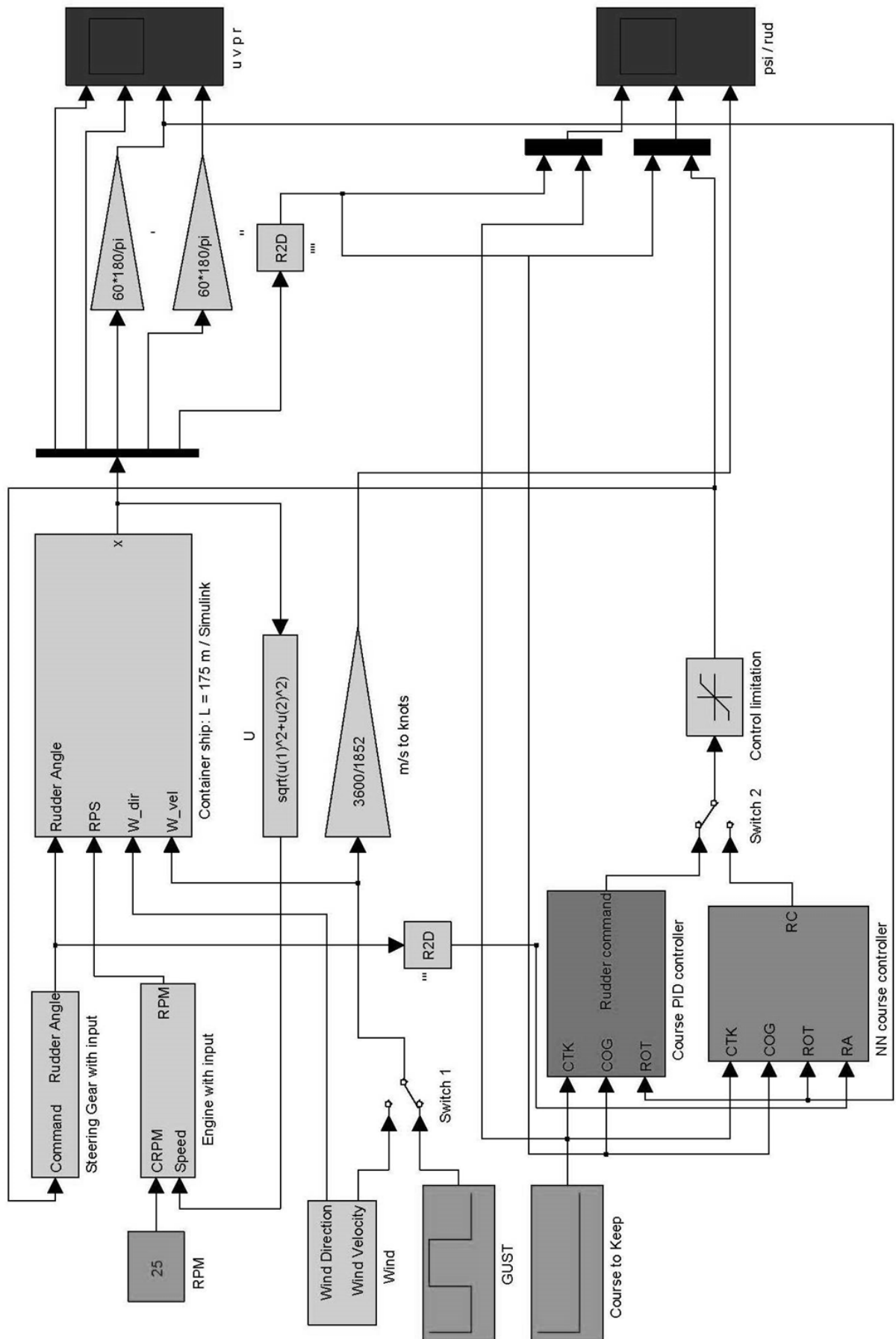


Рис. 4.15. Вид математичної моделі для апробації регуляторів курсу судна

### 4.3.3 Контроль позиції судна по заданій прямолінійній траєкторії

У разі маневрування судна по заданій прямолінійній траєкторії крім управління курсом судна додається управління позицією, метою якого є мінімізація бічного відхилення XTD (cross-track distance). XTD визначається як перпендикуляр опущений з фіксованою точки на судні на лінію маршруту (рис. 4.16).

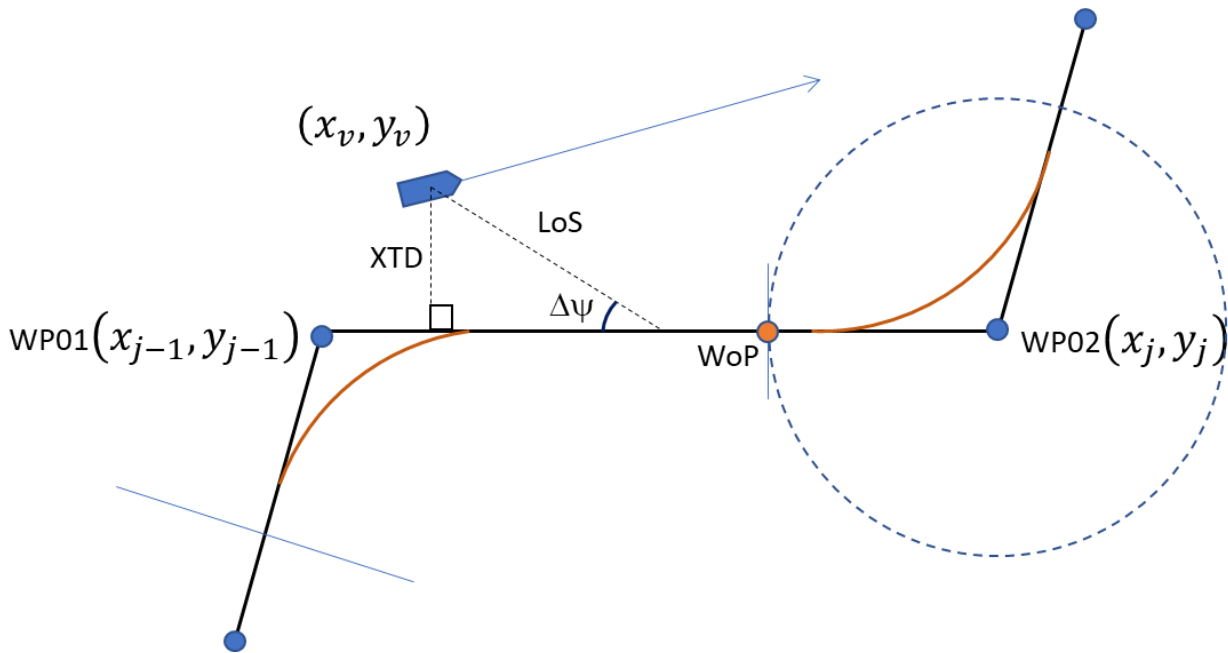


Рис. 4.16. Основні параметри маневрування судна по траєкторії

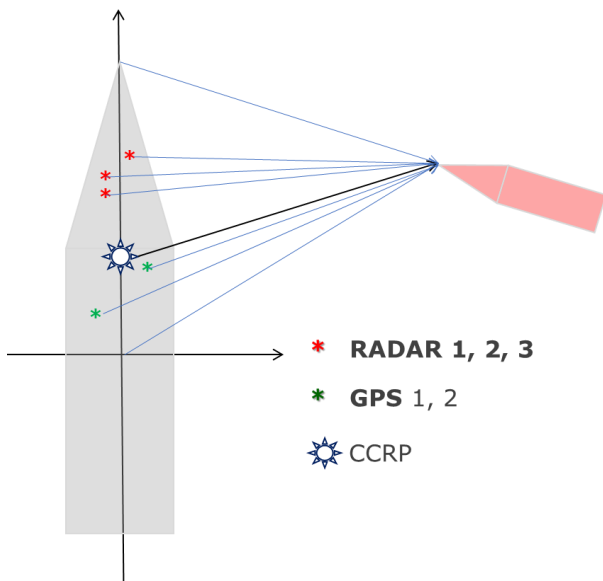


Рис. 4.17. CCRP (Consistent Common Reference Point)

Розрахунки дистанцій та напрямків у цьому параграфі виконуються на плоскості, припускаючи що точне маневрування судна доцільне на відносно невеликих дистанціях. У разі виконання навігації на великих дистанціях, чи необхідності підвищення точності розрахунків, доцільно використовувати відповідні методи сферичної тригонометрії, та

рівняння геодезичної прямої, наприклад, описані у [117, 211].

Як правило, в якості такої точки служить CCRP (Consistent Common Reference Point) – стаціонарна загальна точка відлику (рис. 4.17).

XTD може бути розрахована наступним чином:

$$XTD = \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)} \quad (4.35)$$

$$\Delta x = (x_j - x_{j-1}); \Delta y = (y_j - y_{j-1}); \quad (4.36)$$

$$DTP = \sqrt{(x_v - x_{j-1})^2 + (y_v - y_{j-1})^2}; \quad (4.37)$$

$$DTG = \sqrt{(x_j - x_v)^2 + (y_j - y_v)^2} \quad (4.38)$$

де  $(x_v, y_v)$  – позиція заданої точки судна;  $(x_j, y_j)$  – маршрутна точка з індексом  $j$ ;  $DTP$  (Distance to Previous) – дистанція в попередню маршрутну точку;  $DTG$  (Distance to Go) – дистанція в наступну маршрутну точку.

Для того, щоб запобігти поділу на 0, треба перетворити вираз (4.36) наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} XTD &= \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 + 1}}, \text{ якщо } \Delta x \neq 0 \\ XTD &= (x_j - x_v), \text{ якщо } \Delta x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

XTD розрахований за формулою (4.39) має коректний знак тільки на пеленгах судна на наступну маршрутну точку  $BRG \in (0, 180^\circ)$ .

Визначимо пеленг:

$$\Delta x_{vj} = (x_j - x_v); \Delta y_{vj} = (y_j - y_v) \quad (4.40)$$

$$\left. \begin{aligned} BRG &= \arcsin \Delta x_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \geq 0; \\ BRG &= \frac{\pi}{2} + \arcsin |\Delta y_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ BRG &= \pi + \arcsin |\Delta x_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ BRG &= \frac{3\pi}{2} + \arcsin \Delta y_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

Звідси

$$XTD = \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ при } BRG \in (0, 179^\circ) \quad (4.42)$$

$$XTD = - \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ при } BRG \in (180, 359^\circ)$$

У роботі [253] запропоновано вводити додатковий елемент у рівняння (4.29) з відповідним ваговим коефіцієнтом. У такому разі відхилення XTD працює як пропорційна складова закону управління, та може додати відповідну долю нестабільності у систему управління у цілому. Як варіант, до закону управління можна додати також швидкість наближення до траєкторії у перпендикулярному до неї напрямку, що дозволить отримати більш стабільну поведінку системи та зменшити автоколивання. Закон управління у такому випадку прийме вид:

$$\delta_3 = C_p \Delta \psi + C_d r + \int \Delta \psi dt + C_{pXTD} XTD + C_{dXTD} X\dot{T}D \quad (4.43)$$

Іншим обмеженням такого підходу є те, що якщо пеленг на наступну точку та курс судна відрізняються більше ніж на  $90^\circ$  (судно йде в протилежному напрямі) закон керування не виведе судно на задану траєкторію.

Іншим підходом, відображеним у роботах [67, 64] є використання так званої *лінії видимості* (line of sight - LoS), яку показано на рис. 4.16. У цьому випадку закон управління курсом залишається незмінним, натомість завданий курс має поправку.



$$\psi_{3XTD} = \psi_3 + \Delta\psi_{XTD} \quad (4.44)$$

Позиція  $LoS$   $p_{los}(x_{los}, y_{los})$  розташована десь на прямому відрізку маршруту між точками  $wp_j(x_j, y_j)$  та  $wp_{j-1}(x_{j-1}, y_{j-1})$ . Припустимо що судно знаходиться у центрі кола з радіусом рівним  $n$  його довжин ( $nL$ ). Із прямокутного трикутника з катетом  $XTD$  та гіпотенузою  $LoS$ :

$$\Delta\psi_{XTD} = -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right) \quad (4.45)$$

У відмінність від методу запропонованого у роботі [64] рівняння (4.45) має границю при збільшенні відстані від заданого відрізка маршруту:

$$\lim_{|XTD| \rightarrow \infty} \Delta\psi_{XTD} = \frac{\pi}{2} \quad (4.46)$$

Величина  $LoS$  залежить від розмірів та маневреності судна, тому зручніше її виражати відносно довжини судна,  $LoS = n \times L$ . Моделювання процесу утримання судна на траєкторії показує, що у тиху погоду плавний вихід на завдану траєкторію досягається при  $n \in (2,5)$ .

Для того, щоб забезпечити плавний вихід на траєкторію з більших дистанцій практично обґрунтованою мірою буде обмеження поправки  $\Delta\psi_{XTD}$ , наприклад кутом  $45^\circ$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi_{XTD} &= -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| \leq \frac{\pi}{4} \\ \Delta\psi_{XTD} &= -\frac{\pi}{4} \text{sign}(XTD), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| > \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

Апробація алгоритму управління судном на заданій прямолінійній траєкторії було проведено методом імітаційного моделювання. На рис.4.18 та 4.19 відображено маневр повернення судна на заданий маршрутний відрізок. В якості об'єкта управління розглядалася модель контейнеровоза S-175 [158] наступних розмірів: довжина – 175 м; ширина – 25,4 м; осадка – 8,5 м.

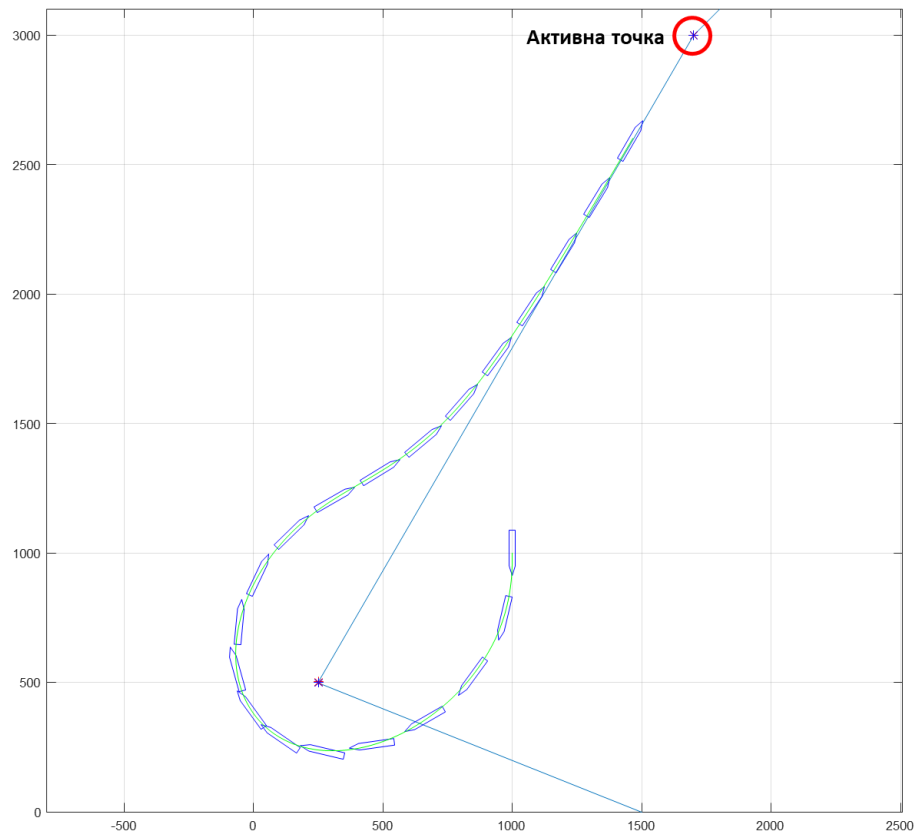


Рис. 4.18. Вихід в активну точку контейнеровозу S-175 - позиція

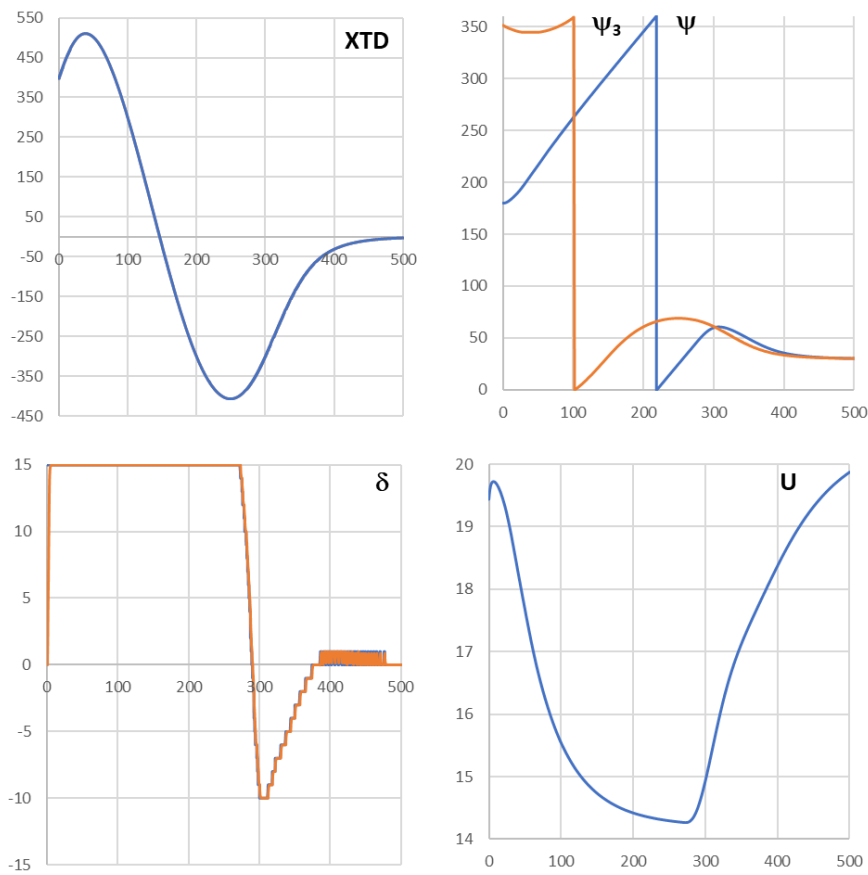


Рис. 4.19. Вихід в активну точку контейнеровозу S-175 – параметри

Кут перекладки стерна в даному випадку було обмежено до  $15^\circ$ . З рис. 4.19 видно, що робота стерна оптимізована по кількості перекладок за рахунок адаптованого закону управління (4.33), судно плавно без автоколивань навколо завдання виходить на завдану траєкторію.

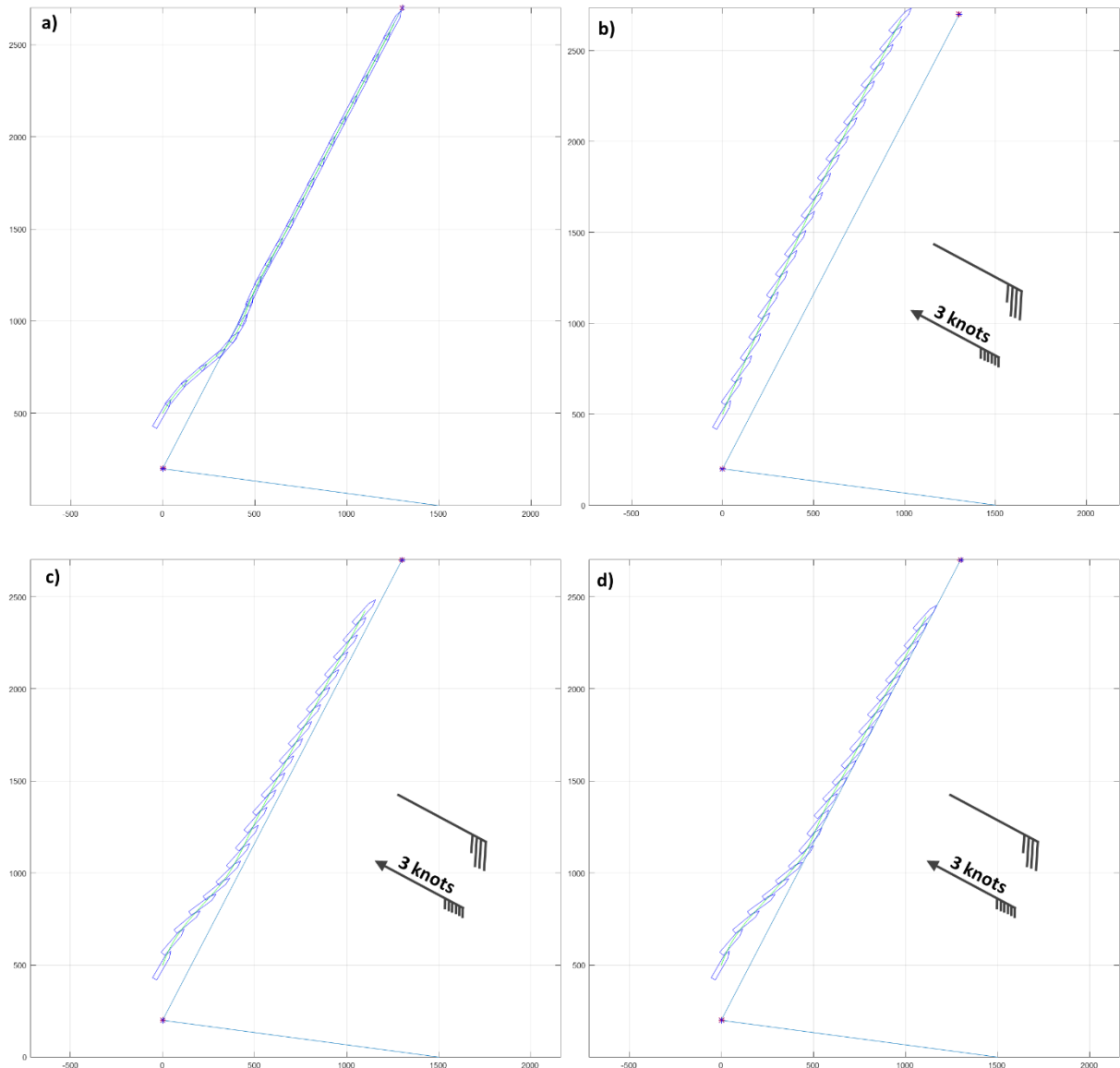


Рис. 4.20. Утримання судна на траєкторії, модель – контейнеровоз S-175, швидкість – 10 вузлів: а) тиха погода ( $C_w = 1$ ); б) бортовий вітер 35 вузлів та течія 2 вузла  $C_w = 1$ ; в) бортовий вітер 35 вузлів та течія 2 вузла  $C_w = 2$ ; д) бортовий вітер 35 вузлів та течія 2 вузла  $C_w = 4$

На рис. 4.20 (а) показано вихід та утримання судна на траєкторії у тиху погоду з фіксованим значенням  $LoS$ , але управління з фіксованим  $LoS$  не працює під дією на судно бортового збурення великої сили (рис. 4.20 (б)), тому

запропоновано динамічно змінювати  $LoS$  залежно від рівня збурення та віддалення від маршрутного відрізка:

$$LoS = \max \left( \frac{1}{C_{w1}} L, C_{w2} \times |XTD| \right), \Delta\psi \leq \Delta\psi_{lim} \left. \vphantom{\max} \right\} \quad (4.48)$$

$$LoS = nL, \Delta\psi > \Delta\psi_{lim}$$

де  $\Delta\psi_{lim}$  - різниця заданого та фактичного курсів, після проходження якої  $LoS$  починає змінюватись залежно від  $XTD$ .

Коефіцієнт  $C_{w1}$  задається пропорційно до погодних умов. Коефіцієнт  $C_{w2}$  визначає кут  $\Delta\psi_{XTD}$ , який по суті обчислюється як  $\arctan\left(\frac{1}{C_{w2}}\right)$ . Тобто при  $C_{w2} = 2$ , як задано при моделюванні відображеному на рис. 4.20,  $\Delta\psi_{XTD} = 31.3^\circ$ .

На рис. 4.21 - 4.23 показано параметри роботи САРТ при бортовому вітрі (швидкість вітру під час симуляції відображено на рис. 4.24) та течії швидкістю 2 вузли з різними величинами  $C_{w1}$  (1; 2; 4). На рис. 4.20 (d) та 4.23 видно, що збільшення  $C_{w1}$  до 4 веде до зменшення  $XTD$ , але з іншого боку до збільшення амплітуди рискання судна біля заданої траєкторії. В цьому випадку при  $C_{w1} = 2$  досягається оптимальне управління з точки зору утримання на траєкторії та роботи стернового пристрою. Оптимальне управління у тиху погоду досягається при  $C_{w1} = 0.5$ .



Рис. 4.21. Перекладки стерна. Утримання судна на траєкторії, модель – контейнеровоз S-175, швидкість – 10 вузлів

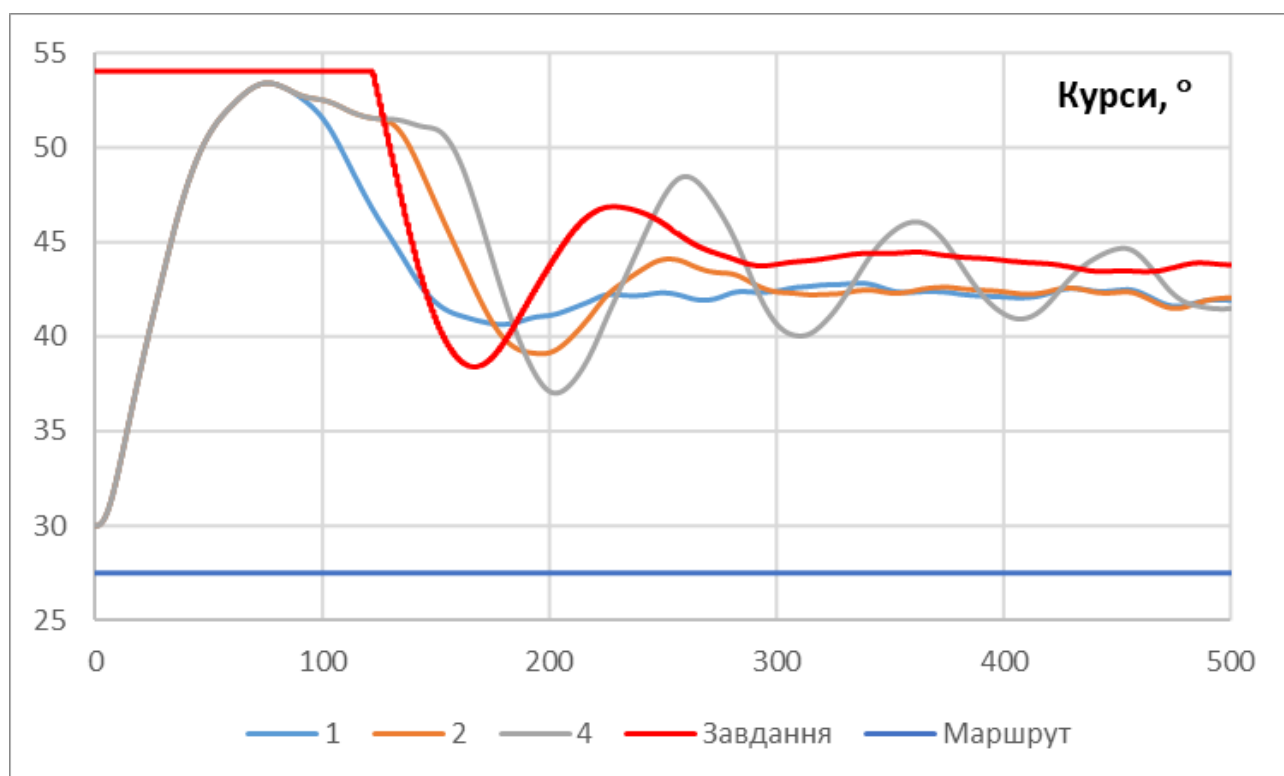


Рис. 4.22. Курс судна та завдання. Утримання судна на траєкторії, модель – контейнеровоз S-175, швидкість – 10 вузлів

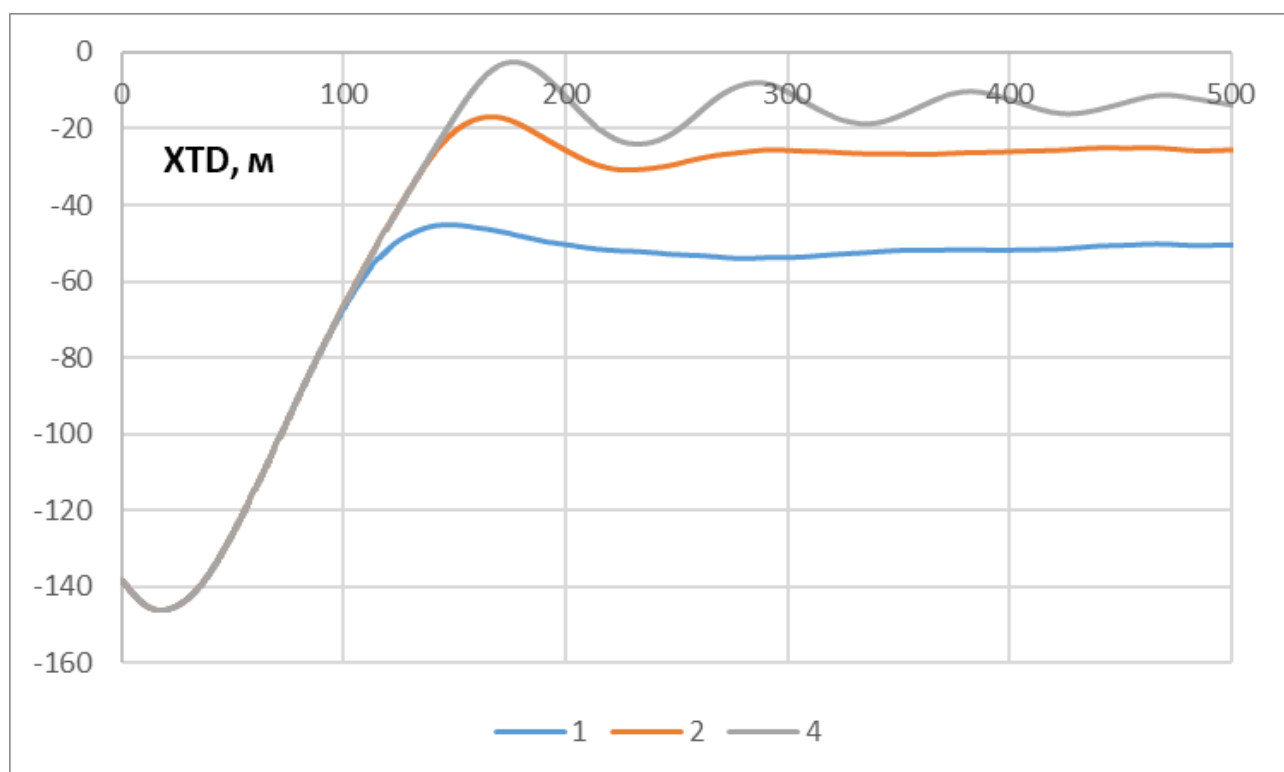


Рис. 4.23. Бокове відхилення від траєкторії. Утримання судна на траєкторії, модель – контейнеровоз S-175, швидкість – 10 вузлів



Рис. 4.24. Швидкість вітру. Утримання судна на траєкторії, модель – контейнеровоз S-175

#### 4.3.4 Контроль повороту під час маневрування судна на заданій траєкторії

Перехід від одного маршрутного відрізка до іншого передбачає рух по криволінійній траєкторії. Ця траєкторія зазвичай є дугою з заданим радіусом. Для того, щоб контролювати динамічний стан судна у процесі повороту, що необхідно для підтримання заданого радіусу, до закону управління необхідно включати обмеження кутової швидкості.

Радіус повороту та кутова швидкість пов'язані простою залежністю:

$$r = \frac{U}{R} \quad (4.49)$$

де  $R$  – радіус повороту.

Таким чином, загальне обмеження кутової швидкості автостернового запропоновано у вигляді

$$\delta_3^* = \delta_3 + C_r \Delta r^3,$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta r &= \text{sign}(r) \cdot r_{lim} - r, \text{ при } |r| > r_{lim} \text{ та } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) = \text{sign}(r) \\ \Delta r &= 0, \text{ при } |r| < r_{lim} \text{ чи } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) \neq \text{sign}(r) \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

Сучасні технології дозволяють практично напряду підключити ЕКНІС до автостернового для маневрування судна на заданій траєкторії. Система дозволяє задавати произвольні радіуси повороту, з деякими обмеженнями які існують в залежності від програмного забезпечення, яке встановлене на судні.

Індикатором переходу судна від режиму удержання на прямолінійному відрізку маршруту до поворота є точка яка знаходиться на відстані від точки перетину дуги та прямолінійного відрізку. Ця точка називається *wheel-over point* (WoP).

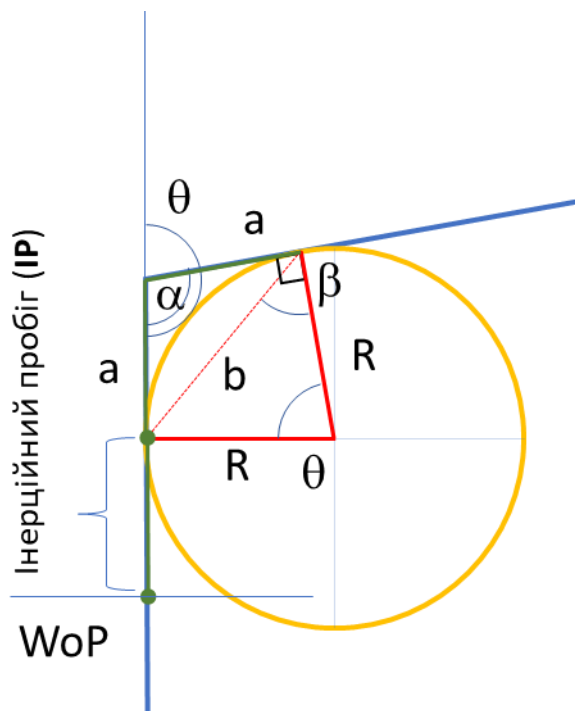


Рис. 4.25. Знаходження WoP в залежності від заданого радіусу повороту

Для того, щоб знайти точки перетину прямолінійних відрізків маршруту і дуги з заданим радіусом  $R$ , необхідно опустити перпендикуляри з центру кола в точки дотику з прямолінійними відрізками. Таким чином, утворюється чотирикутник з двома сторонами рівними радіусу  $R$  і двома сторонами рівними відстані від точки зміни маршрутного відрізка до дотичної з окружністю  $a$ , який ділитися на два рівнобедрених трикутника із спільною основою  $b$ .

Кут  $\theta$  знаходиться як  $\theta = 180 - \alpha$ , де  $\alpha$  - різниця курсів. Спільна основа  $b$  може бути знайдена як

$$b = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (4.51)$$

Косинус кута при основі трикутника

$$\cos \beta = \frac{b}{2R} = \sin \frac{\theta}{2} \quad (4.52)$$

Таким чином, сторона

$$a = \frac{b}{2 \cos(90 - \beta)} \quad (4.53)$$

Після підстановки (4.51) і (4.52) у (4.53) та ряду перетворень отримаємо:

$$a = \left| \frac{R \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \left( 90 - \arccos \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right) \right)} \right| \quad (4.54)$$

Звідси дистанція від точки зміни маршрутного відрізка до точки начала повороту визначається як

$$D_{WOP} = a + IP \quad (4.55)$$

Інерційний пробіг ( $IP$ ) характеризує дистанцію, за яку судно набере необхідну кутову швидкість, та залежить від швидкості судна та кута перекладки руля:  $IP = f(U, \delta)$ .

На рис. 4.26 показана величина інерційного пробігу у різних режимах циркуляції судна. У загальному випадку  $IP \approx (1 \pm 0.25) \times L$ , де  $L$  – довжина судна.  $IP$  збільшується при підвищенні швидкості або зменшенні перекладки руля.

Звісно, судне не завжди може прийти точно в позицію початку повороту. Тому перехід на наступний траєкторний відрізок починається, якщо судно зайшло до кола з радіусом  $D_{WOP}$  (рис. 4.16)

Під час руху по заданій окружності алгоритм описаний рівняннями (4.44) та (4.47) не дозволяє точно утримувати судно на маршруті. Ця задача може бути виконана за рахунок сегментації криволінійної траєкторії на прямолінійні відрізки, використанням референс-моделі [64], динамічним обмеженням кутової швидкості, чи комбінацією цих методів.



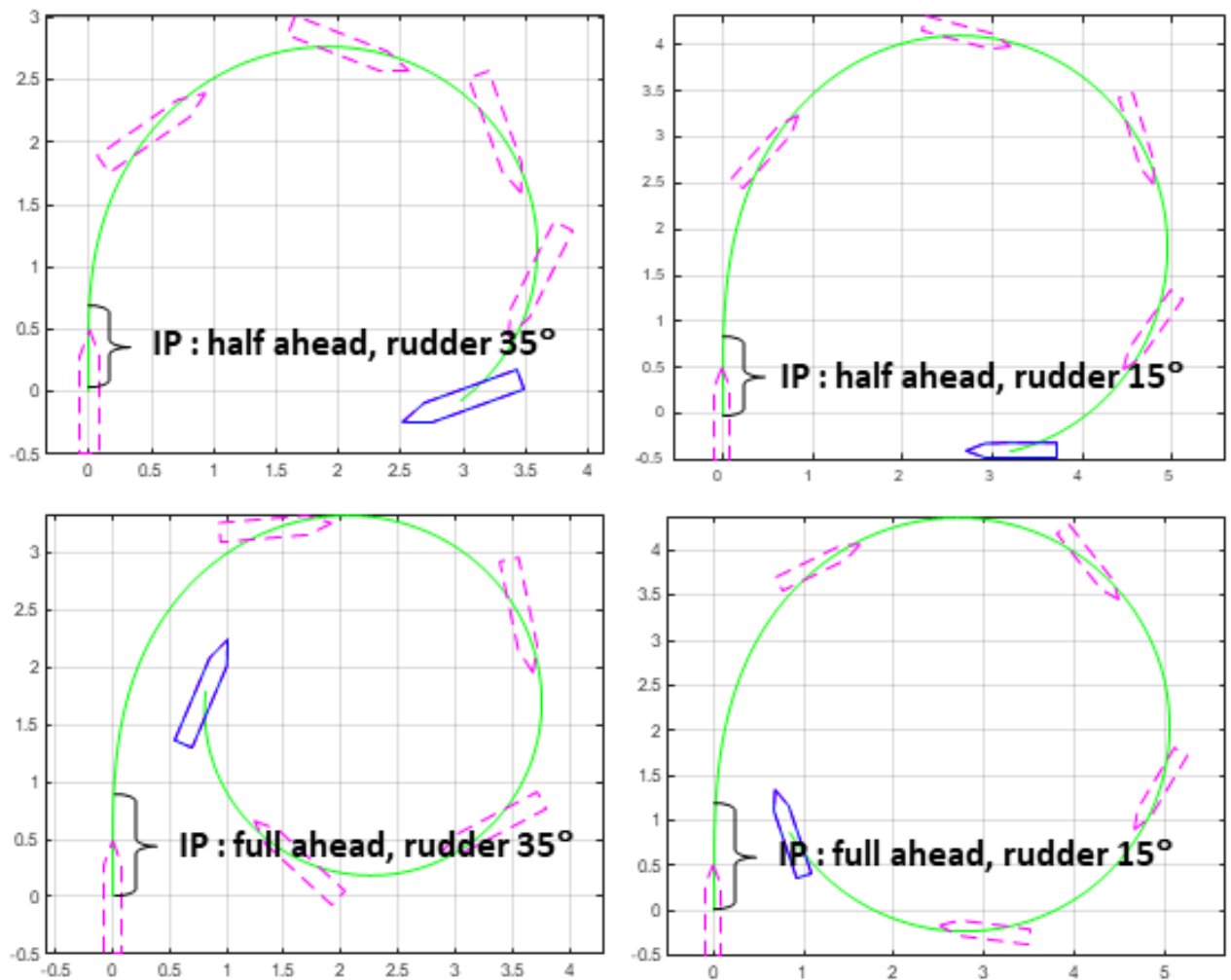


Рис. 4.26. Інерційний пробіг судна на прикладі правої циркуляції контейнеровозу вантажомісткістю 10000 TEU

Під час повороту швидкість поступового руху судна зменшується, а отже згідно до рівняння (4.46) зменшується і необхідна для утримання судна на радіусі  $R$  кутова швидкість.

При цьому, якщо судно зміщується відносно центру дуги повороту, виявляється необхідність в управлінні кутовою швидкістю, для того щоб вивести судно назад на траєкторію.

Відстань судна до центру дуги повороту знаходиться за формулою:

$$R_v = \sqrt{(x_{Rj} - x_v)^2 + (y_{Rj} - y_v)^2}. \quad (4.56)$$

Координати центру дуги у свою чергу знаходяться як:

$$\begin{aligned} x_{Rj} &= x_j - a_j \sin \psi_j + \operatorname{sign}(\alpha) R_j \sin \left( \psi_j + \frac{\pi}{2} \right); \\ y_{Rj} &= y - a_j \cos \psi_j + \operatorname{sign}(\alpha) R_j \cos \left( \psi_j + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.57)$$

Звідси завдана кутова швидкість визначається як

$$\begin{aligned} r_3 &= \operatorname{sign}(\alpha_j) U \left( \frac{2}{R_j} - \frac{1}{R_v} \right), \text{ при } DTP \leq D_{WOP} \\ r_3 &= 0, \text{ при } DTP > D_{WOP} \end{aligned} \quad (4.58)$$

На рис. 4.27 відображено траєкторію судна, яке ведеться САРТ по заданій траєкторії у тиху погоду. На рис. 4.28 та 4.29 відображено кутові швидкості та перекладки стерна відповідно. На рис. 4.30 відображено аналогічний процес управління, але в умовах спрямованих в одну сторону вітра, та течії.

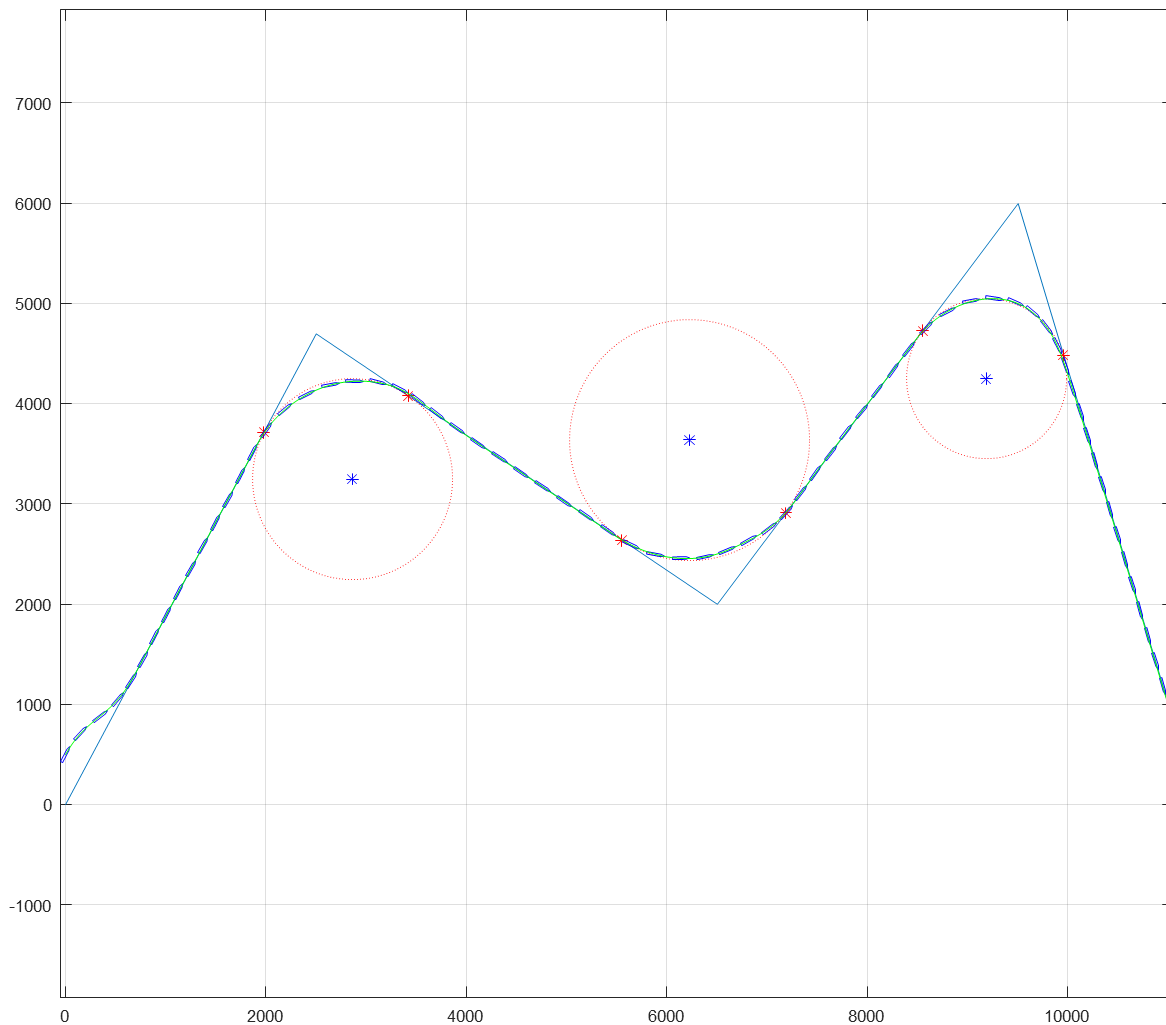


Рис. 4.27. Маневрування судна за заданою траєкторією у тиху погоду, модель – контейнеровоз S-175

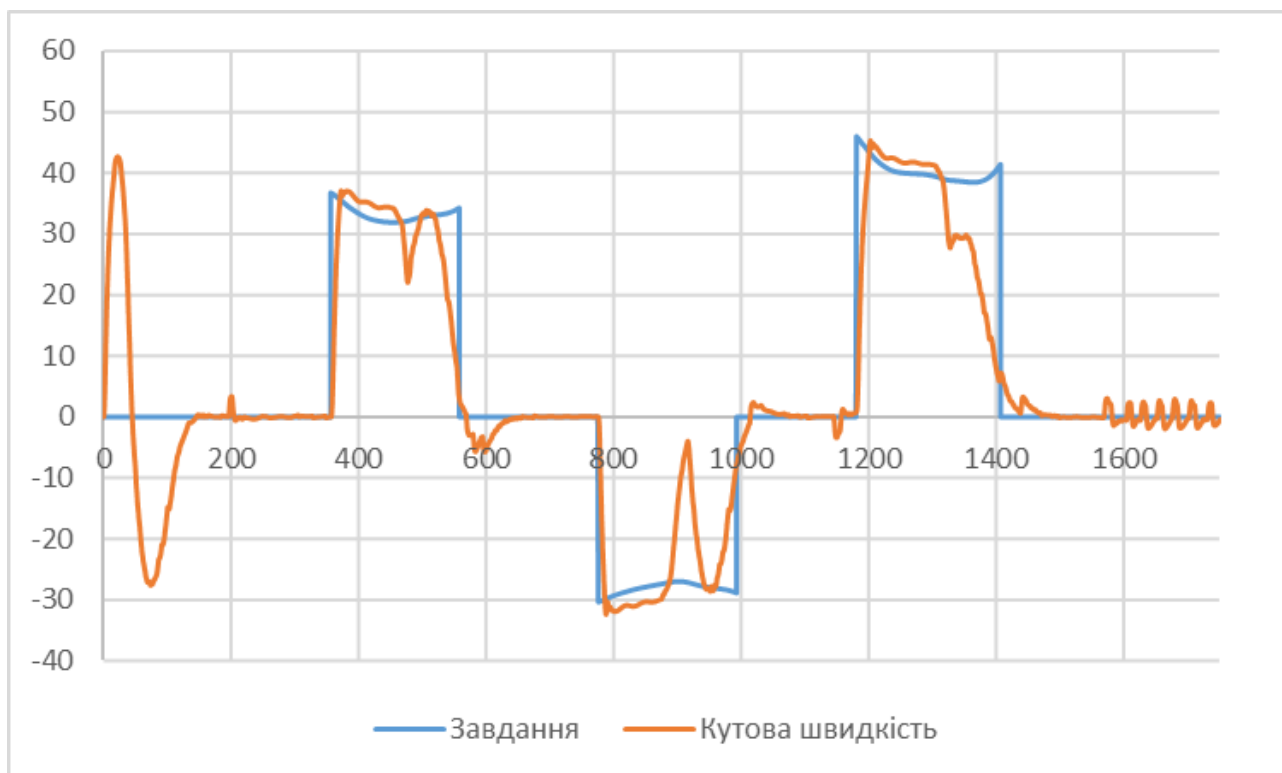


Рис. 4.28. Кутова швидкість, °/хв. Маневрування судна за заданою траєкторією у тиху погоду, модель – контейнеровоз S-175

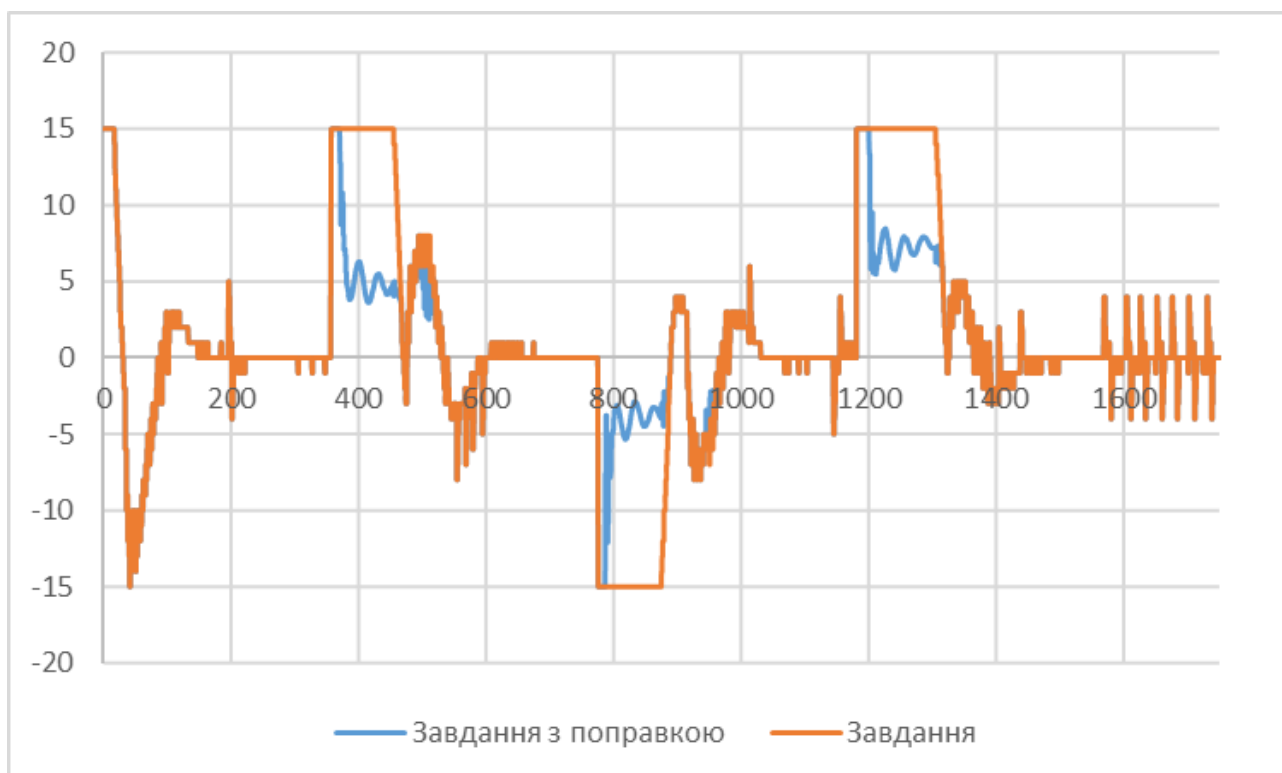


Рис. 4.29. Перекладки стерна, °. Маневрування судна за заданою траєкторією у тиху погоду, модель – контейнеровоз S-175

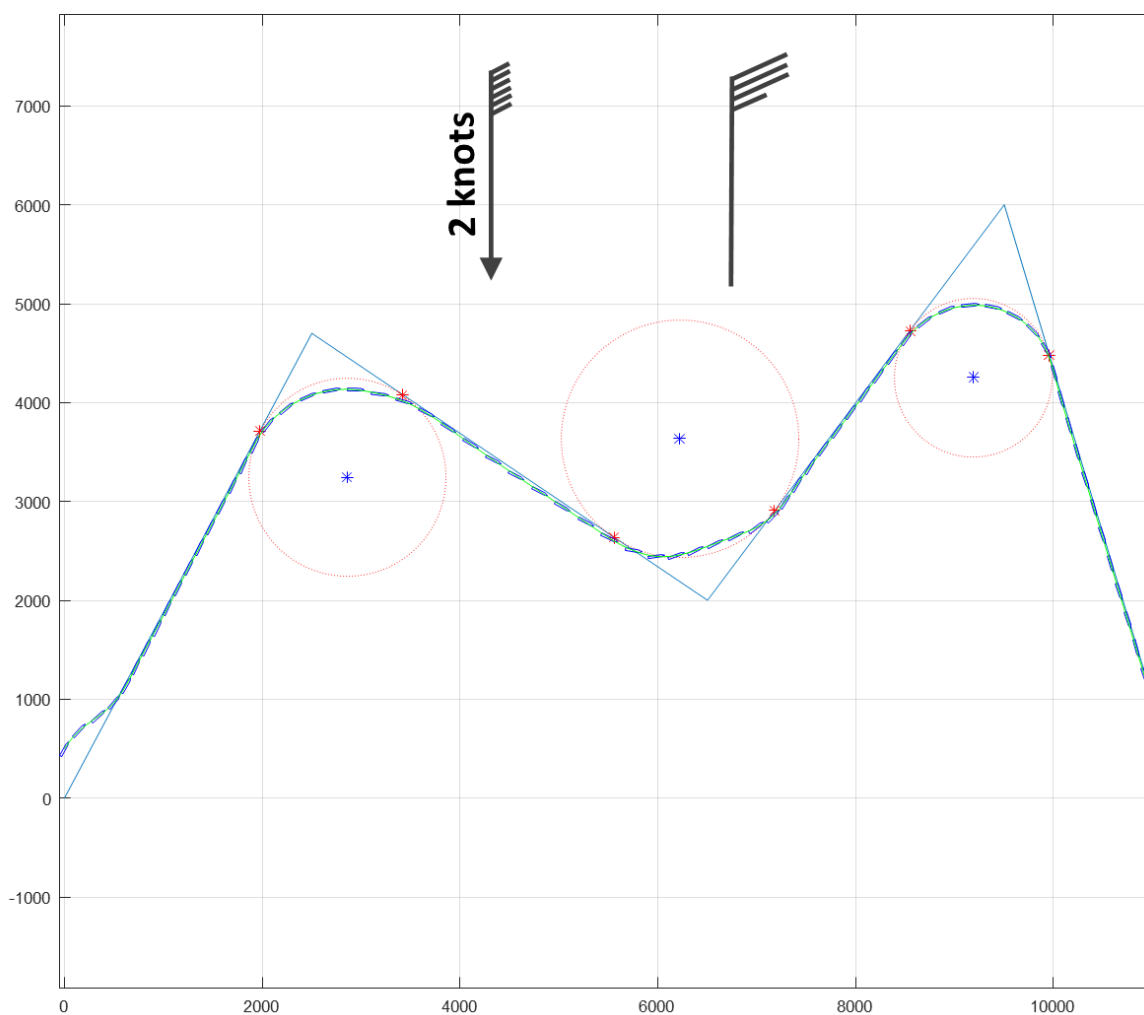


Рис. 4.30. Маневрування судна за заданою траєкторією; швидкість судна – 20 вузлів; вітер  $000^{\circ}$ -35 вузлів та течія  $180^{\circ}$ -2 вузла; модель – контейнеровоз S-175

#### 4.3.5 Аналіз роботи САРТ з різними контролерами курсу

З метою аналізу роботи САРТ із застосуванням різних контролерів було проведено моделювання процесу управління судном на програмному забезпеченні MATLAB Simulink. Модель САРТ була синтезована відповідно до структури, наведеної на рис. 4.10. Моделювання полягало у виконанні таких маневрів з таблиці 4.1 як «Стабілізація» і «Плановий маневр».

В якості об'єкта управління розглядалася модель контейнеровоза S-175 [158].

ПІД-контролер був змодельований відповідно до роботи [65] і налаштований вручну, нечіткий контролер був отриманий на основі роботи [208], нейронний – згідно до рівнянь (4.33) та (4.34).

Моделювання процесу управління проводилося з урахуванням впливу збурюючих впливів, а саме вітру і течії. Збурення мали такі параметри: напрямок вітру  $\psi_w = 110^\circ$  з розкидом в  $10^\circ$ , швидкість вітру  $V_w = 30$  вузлів з поривами до 10 вузлів; напрямок течії  $\psi_T = 250^\circ$ , швидкість течії  $V_T = 2$  вузла. Розрахунок сил від впливу вітру проводився на основі роботи [107]. Облік течії проводився шляхом вирішення відповідного векторного трикутника. Результати моделювання за основними параметрами якості роботи САРТ наведені в таблиці 4.3.

*Таблиця 4.3. Кількісні показники розглянутих способів управління*

| Параметри якості                                                                                       | Нейронне управління | Управління з нечіткою | ПІД управління |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| Перерегулювання під час маневру по траєкторії, м                                                       | 19                  | 135                   | 80             |
| Час перерегулювання (під час маневру по траєкторії під дією вітру і течії), с                          | 82                  | 204                   | 197            |
| Дисперсія кладок стерна (під час маневру по траєкторії під дією вітру і течії), град <sup>2</sup>      | 70.8                | 72.1                  | 141.8          |
| Дисперсія кладок стерна (під час стабілізації на траєкторії під дією вітру і течії), град <sup>2</sup> | 1.5                 | 58.2                  | 11.0           |
| Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні (під час маневру по траєкторії), град               | 12                  | 15                    | 15             |
| Дисперсія відхилень від траєкторії (під час стабілізації під дією вітру і течії), м                    | 39.8                | 5.0                   | 48.0           |

Проаналізувавши чисельні показники розглянутих способів управління можна виділити переваги і недоліки окремих з них.

Застосування нечіткого контролера ефективно тільки в режимі стабілізації, проте вимагає частих кладок стерна, що в цілому не виправдано з точки зору підвищеної витрати моторесурсу стернової машини і енерговитрат. Для ефективної роботи нечіткого контролера необхідний алгоритм адаптації, який вимагає істотних часових і обчислювальних витрат.

Застосування ПІД-контролера в САРТ забезпечує надійну роботу всієї системи завдяки своїй простоті. Стосовно підвищення експлуатаційних показників судна ПІД-контролер вимагає наявності алгоритму адаптації, а також високочастотного фільтра для незмірюваних збурень (хвилювання).

Застосування нейроконтролера в САРТ дозволяє виконувати високоточне маневрування по траєкторії з кращою, в порівнянні з іншими розглянутими контролерами, дисперсією кладок стерна. У режимі стабілізації нейроконтролер забезпечує точне утримання судна на траєкторії з мінімальною дисперсією кладок стерна.

#### *Висновки за розділом 4*

У розділі наведене рішення допоміжних задач, пов'язаних з моделюванням руху судна, таких як розрахунок динамічної остійності судна на довільному профілі хвильової поверхні, урахування крену судна у моделях плоского руху та управління судном на траєкторії.

Удосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок свобідного падіння та інших подібних об'єктів для використання на симуляторах. Зокрема, використано однопараметричну залежність ширини перетину корпусу судна від заданої осадки на базі штучних нейронних мереж та градієнтний метод пошуку точки перетину збуреної поверхні води з корпусом судна у комбінації з потрійним інтегруванням зануреної частини корпусу, що дозволяє знайти її центроїд для довільної орієнтації на нерегулярному профілі хвилювання.

Запропоновано метод розрахунку бортового нахилення судна під час маневрування, в залежності від його динамічного стану, та параметрів остійності. Отримані залежності можуть бути додані у модель маневрування судна. На відміну від методу розрахунку динамічної остійності, цей метод потребує меншу кількість вхідних даних, та менше обчислюваних ресурсів, що

може бути більш ефективним для задач маневрування на площині, для суден на які заданий стан морського хвилювання не має значного впливу.

Запропоновано закон керування судном структурно схожий на ПД-закон, але реалізований на базі штучних нейронних мереж прямого поширення зі зворотним зв'язком по різниці курсів, швидкості зміни різниці курсів та фактичному положенню пера керма. Це з одного боку дозволяє застосовувати стандартні алгоритми фільтрації вимірювань і адаптації до коефіцієнтів ПД закону, а з іншої сторони "зберігати" в матричному вигляді "пам'ять" про різні режими управління, за рахунок коефіцієнтів нейронної мережі.

Отримали подальший розвиток методи управління судном на траєкторії. Встановлено взаємозв'язки між маршрутом судна, та необхідними динамічними параметрами для утримання судна на траєкторії.

## РОЗДІЛ 5. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

### *5.1 Особливості застосування методів об'єктно орієнтованого програмування при розробці навігаційних симуляторів*

Для більш повного імітаційного моделювання та наступного налізу комплексних навігаційних задач, таких як робота суден у групі, робота судна з буксирами, буксировка об'єктів на гнучкому зв'язку, розходження суден доцільно розробити віртуальне середовище, у якому можуть взаємодіяти групи суден та інші об'єкти.

Для задач дисертаційного дослідження було обрано два основних методи імітаційного моделювання:

- швидки симуляції (Matlab R2014);
- симуляції у реальному часі з повною візуалізацією об'єктів (Unity 2020.1.1.17f1).

Перший метод застосовувався для отримання даних про стан та характеристики об'єктів у прискореному часі переважно у чисельному чи графічному вигляді для подальшого аналізу.

Другий метод застосовувався для симуляції навігаційних задач у реальному часі, та відпрацювання їх з групами спеціалістів морського транспорту. Треба відмітити, що саме метод симуляції у реальному часі дозволив виявити цілий ряд проблем та недопрацьованих частин алгоритмів, які зазвичай проявляються під час тестування системи операторами.

Наприклад, поправка до моделі хідкості, відображена у рівнянні (3.40), виникла під час тестування моделей судна на симуляторі в перехідних режимах з переднього на задній хід.

Ціла низка поправок до методу розрахунку остійності судна на довільному профілі хвилювання виникла саме після візуалізації корпусу з прозорими



бортами на профілі хвилювання з відображенням точок перетину у реальному часі, та можливістю обертання корпусу на довільні кути.

Таким чином, імітаційне моделювання з візуалізацією в певних межах дозволяє отримати переваги фізичного моделювання за рахунок наочності та можливості маніпуляцій з псевдо-фізичним (візуальним об'єктом).

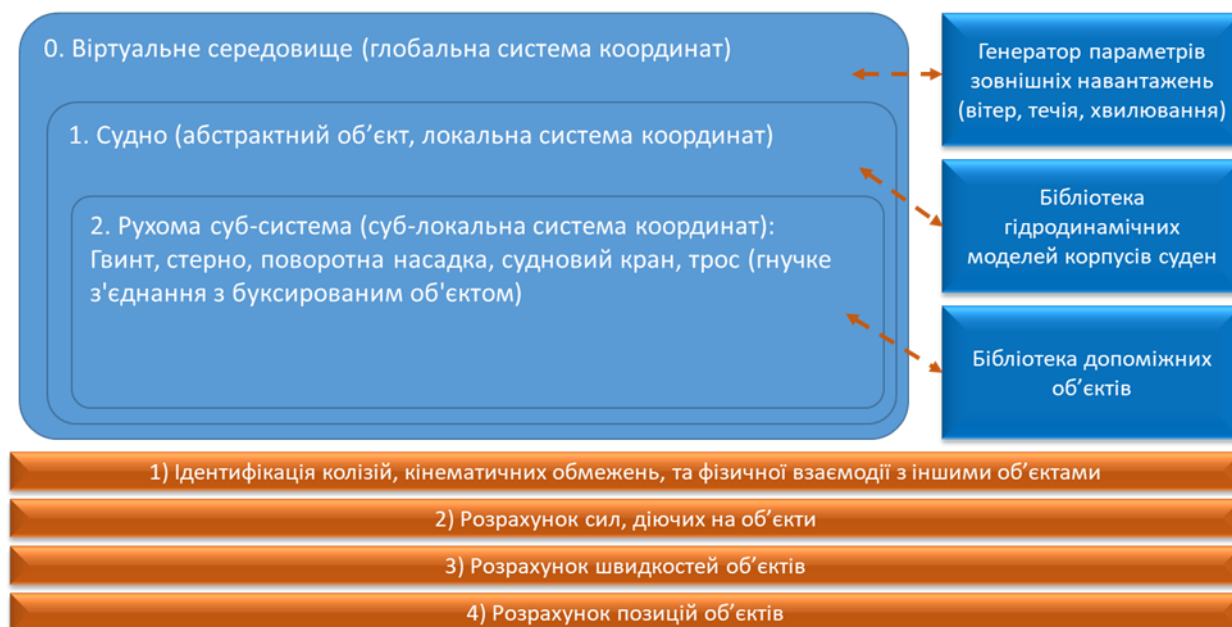


Рис. 5.1. Схема програмної реалізації групи суден в середовищі симулятора методами об'єктно орієнтованого програмування

Для того щоби промоделювати взаємодію групи суден при вирішенні комплексної навігаційної задачі було використано методи об'єктно орієнтованого програмування з декількома основними видами абстрактних об'єктів таких як

- **віртуальне середовище** – об'єкт який включає в себе взаємодію усіх інших об'єктів: динамічних (судна, водна поверхня, інші рухомі об'єкти) та статичних (елементи навігаційної обстановки);
- **судно** – рухомий об'єкт, якому присвоєна низка якостей та методів, з загальної фізичною структурою згідно до рівняння (3.1). Сили, діючи на судно розраховуються у зв'язаню з його центром ваги системою координат;

- **допоміжні об'єкти**, такі як, наприклад, рушії судна, трос, який пов'язує судна, підйомний кран, реалізуються окремо, та, при необхідності, мають свою локальну систему координат.

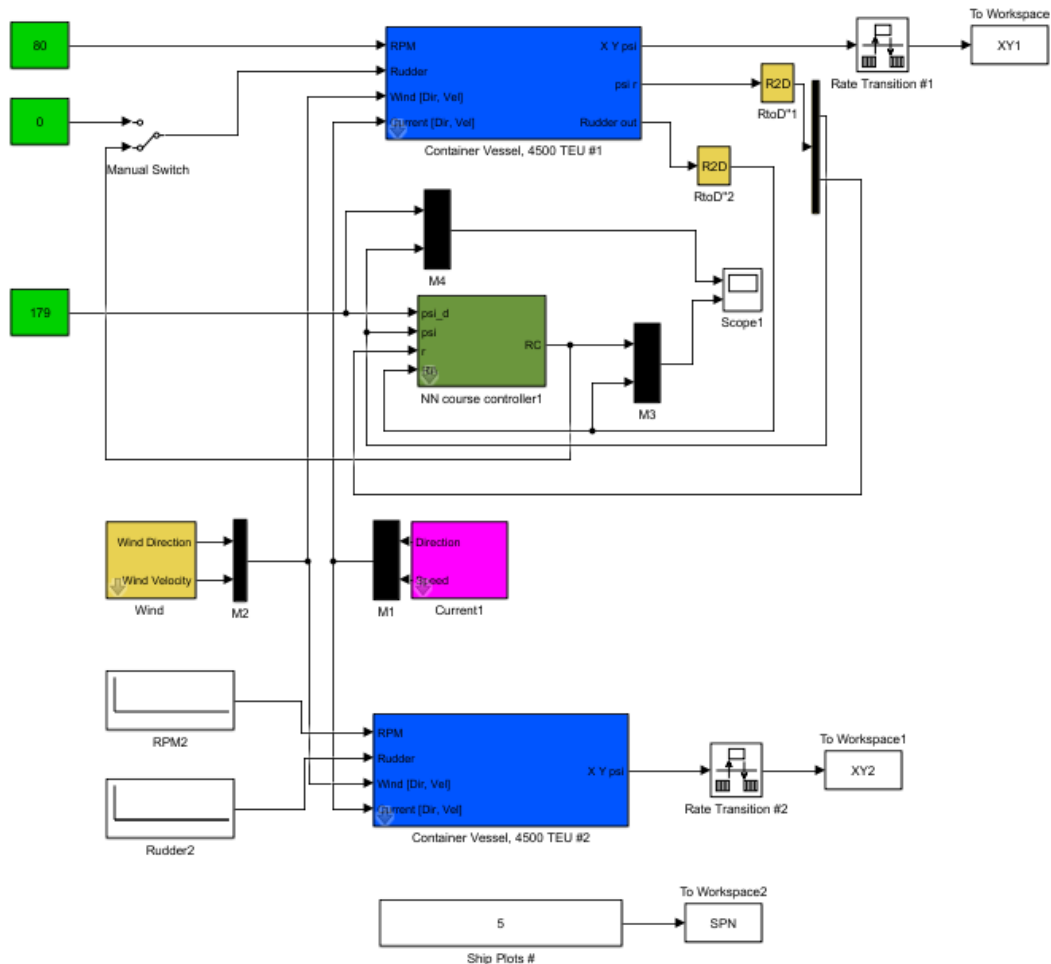


Рис. 5.2. Блок-схема системи взаємодії двох великотоннажних суден у середовищі Matlab Simulink

Описані об'єкти пов'язані функціональними зв'язками з бібліотеками моделей, які в залежності від обраних параметрів визначають форму функціональних залежностей, які служать для розрахунку сил взаємодії, швидкостей та позицій об'єктів.

Важливим етапом, який передуює розрахунку сил, є визначення колізій, кінематичних обмежень, і сил взаємодії, що буде перешкоджати віртуальному "проходженню" об'єктів крізь один одного і нескінченного розтягування гнучких зв'язків. Саме тому для симуляції у реальному часі було обрано систему Unity 2020.1.1.17f1, яка має стандартні бібліотеки для визначення кол



Рис. 5.3. Сцена з навігаційного симулятора у середовищі Unity

## 5.2 Математичне моделювання системи судно-буксир

### 5.2.1 Стан проблеми моделювання системи судно-буксир

Роботі портових буксирів властивий високий рівень ризику. Згідно з даними Європейського агентства з морської безпеки (EMSA) 23% аварій суден технічного флоту пов'язано з буксируванням [58]. Всього за період з 2011 по 2015 рік сталося 236 інцидентів, 43 з яких пов'язані зі значними пошкодженнями або повною втратою суден, а також із загибеллю членів екіпажу. У це число входить 11 перекинутих і затонулих в європейських водах буксирів.

В результаті розслідувань цих інцидентів було виявлено, що підготовці капітанів та проблемам остійності буксирів приділяється недостатньо уваги.

Так, наприклад, робота буксира на відтяжку в режимі «ніс-до-носа» на ходу вимагає як хороших навичок управління, так і чіткого розуміння фізичних процесів, закладених в основі цієї операції.

Особливу увагу слід приділяти буксирам, що працюють в режимі «ескорта». Ескорт проводиться на швидкостях 4-8 вузлів, що пов'язано зі швидкістю, яка відповідає установці телеграфу «найменший вперед» («dead slow ahead») судна-об'єкта. На цих швидкостях значно збільшується взаємодія між суднами і гідродинамічні сили на корпусі буксира.

Перекидання буксирів найчастіше відбувається або в результаті зіткнення в момент підходу до носа судна для кріплення троса, або в результаті гіртинга. Гіртинг – явище втрати керованості буксиром, який тягнеться судном-об'єктом, що може призвести до перекидання.

Процес навчання керуванню буксиром на реальному об'єкті в портах з інтенсивним судноплавством є складним. Тому більш ефективною на початкових стадіях є підготовка фахівців за допомогою тренажерів.

Однак не завжди можливості тренажера дозволяють промодельовувати всі небезпечні ситуації (наприклад, гіртинг і перекидання).

Тому актуальним є питання розробки програмного забезпечення, що дозволяє для певного типу буксира задати необхідні початкові умови і потім промодельовувати небезпечні ситуації. Водночас все більш широко в різних портах використовуються так звані ASD Escort Tugs – буксири, обладнані азимутальними рушіями, та які володіють рядом властивостей, що дозволяють безпечно проводити операції на швидкостях 4-8 вузлів.

В існуючих публікаціях можна зустріти структуру математичної моделі буксира [12, 30, 31, 168], яка в загальному вигляді відображає діючі на нього сили. Однак більш докладні дані, такі як функції розрахунку окремих сил і коефіцієнтів, часто не згадуються.

Можна виділити дві основні групи математичних моделей руху буксирів:

- моделі руху на площині [12, 168];
- моделі руху на площині з врахуванням остійності [30, 31];

Так в статті [12] була отримана спрощена модель буксира, що працює в стійких режимах на укол і на відтяжку. Водночас сили, що розвиваються рушієм узагальнені як вектор, а коефіцієнти сил опору виражені пропорційно кутам

дрейфу. Таку модель добре використовувати для попереднього розрахунку діаграм зусиль, що розвиваються буксиром в усталених режимах руху.

В результаті досліджень Бреднера [30, 31] була отримана напівемпірична модель динаміки буксира з азимутальними рушіями. Однак основна увага в цих роботах приділяється взаємодії рушіїв. Незважаючи на те, що елементи остійності включені в структуру моделі, в результатах розрахунків нахилення буксира не наводяться.

Крім того, в літературі чітко не описана модель взаємодії системи судно-буксир.

Моделюванню руху великотоннажних суден, в даному випадку судна-об'єкта, присвячено багато робіт, в тому числі [118,158, 245, 287].

Загалом, описані роботи можна використовувати як базу для розробки моделі системи буксир-судно з урахуванням остійності першого.

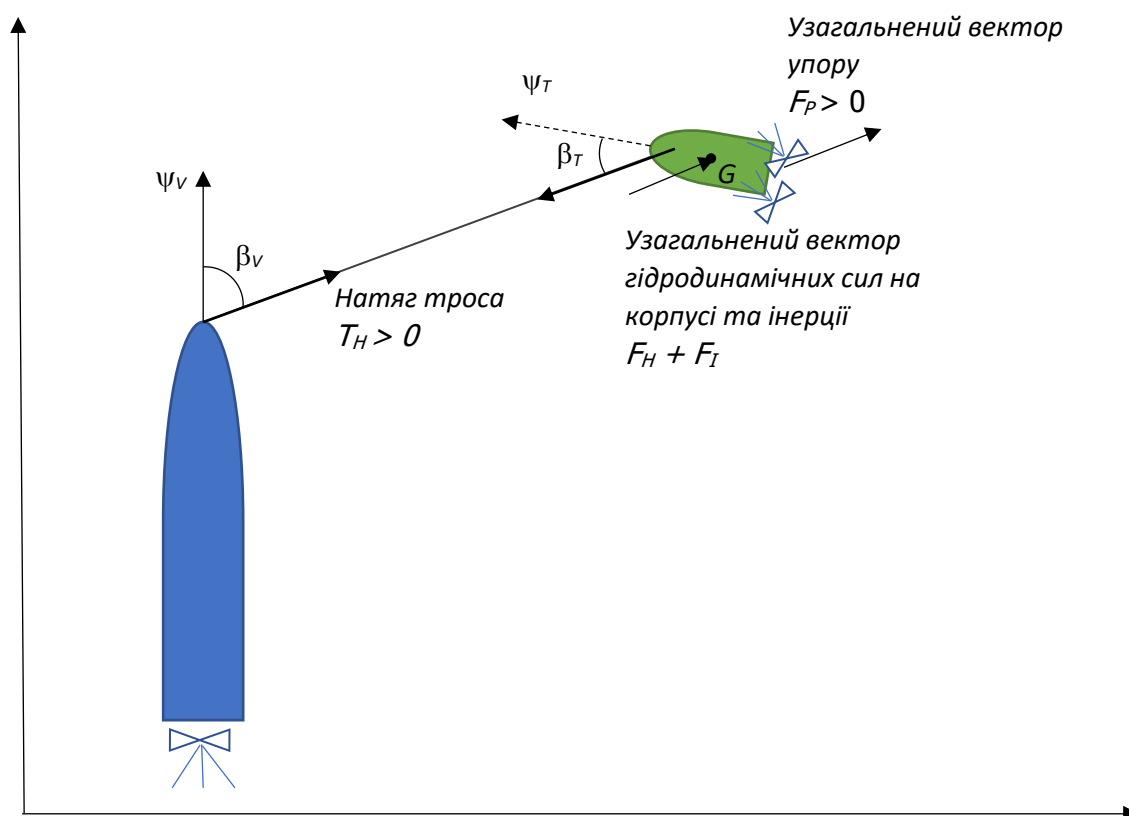


Рис. 5.4. Спрощена схема взаємодії судна з буксиром

### 5.2.2 Структура математичної моделі буксира

У результаті аналізу ряду досліджень [12, 30, 31, 168, 118, 157, 158, 219, 220] була обрана наступна система рівнянь, яка описує рух буксира:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11})\dot{u} - (m + m_{22})vr &= X \\ (m + m_{22})\dot{v} + (m + m_{11})ur &= Y \\ (I_{44} + J_{44})\dot{p} &= K \\ (I_{66} + J_{66})\dot{r} &= N - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

де  $m$  – масова водотоннажність судна;  $m_{11}$ ,  $m_{22}$  – приєднані маси,  $I_{44}$ ,  $I_{66}$  – моменти інерції,  $J_{44}$ ,  $J_{66}$  – приєднані моменти інерції,  $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $r$  – поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості відносно поперечної і вертикальної осей відносно центру ваги судна відповідно;  $X$ ,  $Y$ ,  $K$ ,  $N$  – гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

У розгорнутому вигляді гідродинамічні сили і моменти представимо як:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_{TL} \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_{TL} \\ K &= K_H + K_P + K_{TL} + K_{ROLL} \\ N &= N_H + N_P + N_{TL} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

де індекси:  $H$  – корпус;  $P$  – узагальнена сила гвинто-стернової групи;  $TL$  – натяг буксирної лінії;  $ROLL$  – відновлюючий момент і інерція.

### 5.2.3 Сили опору на корпусі

Сили опору на корпусі визначаються як:

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{1}{2} C_{HX}(u, \beta, r) \cdot \rho L d U^2 \\ Y_H &= \frac{1}{2} C_{HY}(\beta, r) \cdot \rho L d U^2 \\ K_H &= (z_H - z_G) \cdot Y_H \\ N_H &= \frac{1}{2} C_{HN}(\beta, r) \cdot \rho L^2 d U^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

де  $C_H$  – коефіцієнти сил і моментів опору по відповідних осях,  $\rho$  – щільність морської води,  $L$  – довжина судна,  $d$  – осадка судна,  $U$  – абсолютна швидкість

судна,  $u$  – поздовжня складова швидкості судна,  $\beta$  – кут дрейфу (позитивний проти годинникової стрілки),  $r$  – швидкість зміни курсу,  $z_G$  – апліката центру ваги,  $z_H$  – апліката центру зануреної частини корпусу.

Коефіцієнти  $C_H$ , як правило, отримують експериментальним шляхом [12, 31, 219]. Однак наближено їх також можна визначити за допомогою методів, описаних в роботах [219, 245, 287].

#### 5.2.4 Сили, що розвиваються азимутальними рушіями

У публікації [12] сила упору рушіїв відображена як сумарна величина  $F_P > 0$ . Напрямок прикладання  $F_P$  залежить від заданого кута  $\delta$ . Ця умова справедлива для синхронної роботи азимутальних рушіїв у стійких режимах буксирування. В процесі виконання операцій на азимутальних рушіях досить частим способом зниження швидкості або натягу, крім зміни навантаження, є розведення гвинтів по бортах на кути 30-150° в залежності від напрямку руху. Також застосовується метод «асинхронного» управління, коли один рушій працює тільки на упор, а іншим задають обертання.

Тому, для моделювання невстановленого процесу буксирування гвинто-стернові групи буде доцільно розділити.

Сила упору одного гвинта визначається за формулою:

$$F_P = (1-t) \rho \cdot K_T(J, \theta_P) D_P^4 n |n| \quad (5.4)$$

$$J = \left| \frac{U_P (1-w)}{n D_P} \right|, \quad (5.5)$$

де  $t$  – емпіричний коефіцієнт зменшення упору,  $n$  – обороти гвинта,  $D_P$  – діаметр гвинта,  $K_T$  – коефіцієнт упору,  $J$  – ковзання гвинта,  $\theta_P$  – кут розвороту лопатей гвинта,  $U_P$  – швидкість потоку на гвинті,  $w$  – емпіричний коефіцієнт впливу корпусу.

У рівнянні (5.4), замість прийнятого в літературі  $n^2$ , обороти представлені як  $n|n|$  з метою моделювання роботи гвинта на задній хід.

Взаємний вплив проявляється, коли обидва гвинти працюють на один борт. Згідно з роботою [31], на гвинті, який знаходиться попереду, відбувається зменшення ефективного упору, викликаного накиданням на нього потоку гвинтом позаду. У роботах [31, 46] наведені методи, що дозволяють врахувати взаємодію гвинтів. Досить точним і зручним для наближеного моделювання є метод запропонований Дангом [46]:

$$F_p^* = C_{t\theta} F_p \quad (5.6)$$

$$C_{t\theta} = C_t + (1 - C_t) \frac{\theta^3}{130 / C_t^3 + \theta^3} \quad (5.7)$$

$$C_t = 1 - 0,8 \left( l_p / D_p \right)^{2/3} \quad (5.8)$$

де  $C_{t\theta}$  – коефіцієнт взаємодії;  $\theta$  – кут між осями азимутальних рушіїв;  $C_t$  – коефіцієнт взаємодії при  $\theta = 0$ ;  $l_p$  – відстань між гвинтами.

Сили упору з урахуванням поділу рушіїв на лівий і правий борт:

$$\left. \begin{aligned} X_p &= F_p^S \cos \delta_s + F_p^P \cos \delta_p \\ Y_p &= F_p^S \sin \delta_s + F_p^P \sin \delta_p \\ K_p &= (z_p - z_G) \cdot Y_p \\ N_p &= x_p \cdot Y_p - y_p^S \cdot F_p^S \cos \delta_s - y_p^P \cdot F_p^P \cos \delta_p \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

де  $x_p, y_p, z_p$  – позиція відповідного гвинта.

Компонент бічної сили, створюваної обертанням гвинта, в даному випадку не враховується.

### 5.2.5 Урахування остійності буксира

На основі [116] рівняння бортових коливань запишемо як:

$$a_{42} \cdot \dot{v}_G + b_{42} \cdot v_G + (I_{kk} + a_{44}) \dot{p}_G + b_{44} \cdot p_G + a_{46} \cdot \dot{r}_G + b_{46} \cdot r_G = K, \quad (5.10)$$

де  $a$  – коефіцієнти інерційних сил;  $b$  – коефіцієнти демпфуючих сил;  $K$  – сумарний кренувальний момент;  $\varphi$  – кут крену; індекси 1,2,3 – відповідають лінійним переміщенням по поздовжній, поперечній і вертикальній осях; індекси



4,5,6 – відповідають обертовим рухам відносно поздовжньої (крен), поперечної (диферент) і вертикальної (рисання) осей судна.

На відміну від бортової хитамиці на хвилюванні, нахил судна під час маневру не має періодичного характеру. Відповідно до роботи [116] коефіцієнти демпфуючих сил при уявній частоті хвилювання близької до нуля також дорівнюють нулю, крім коефіцієнта  $b_{46}$ , який залежить від приєднаних мас і коефіцієнта  $b_{44v}$ , який виражає нелінійне в'язкісне демпфірування. Коефіцієнти  $a_{42}$ ,  $a_{44}$ ,  $a_{46}$ ,  $b_{46}$  з урахуванням перетворень, пов'язаних з тим, що уявна частота хвилювання дорівнює нулю, визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} a_{42} &= m_{42} + OG \cdot m_{22}; \\ a_{44} &= m_{44} + m_{42} + OG \cdot (m_{24} + OG \cdot m_{22}); \\ a_{46} &= (m_{42} + OG \cdot m_{22}) \cdot L; \\ b_{46} &= -u \cdot (m_{42} + OG \cdot m_{22}). \end{aligned} \quad (5.11)$$

де  $m_{ii}$  – коефіцієнти приєднаних мас;  $OG$  – довжина перпендикуляра, опущеного з центру ваги на площину ватерлінії;  $L$  – довжина судна між перпендикулярами;  $u$  – поступальна швидкість судна.

Коефіцієнт  $b_{44v}$  можна визначити методом Ікеда [116], виключивши при цьому складові, залежні від уявної частоти хвилювання:

$$b_{44v} = b_{44f}(\varphi_a, \omega_n, u) + b_{44l}(u) \quad (5.12)$$

де  $b_{44f}$  – коефіцієнт тертя,  $b_{44l}$  – підйомний коефіцієнт,  $\varphi_a$  – амплітуда бортового нахилу;  $\omega_n$  – власна частота бортових коливань.

В результаті момент  $K_{ROLL}$  розраховується за формулою:

$$K_{ROLL} = a_{42} \cdot \dot{v}_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - b_{44v} \cdot p_G - K_\varphi. \quad (5.13)$$

де  $K_\varphi$  – відновлюючий момент.

У разі відсутності детальної інформації про остійність, відновлюючий момент можна розрахувати як:

$$K_\varphi = GM \cdot g \cdot m \cdot \sin(\varphi) \quad (5.14)$$

Однак для більш точної оцінки слід замінити метацентричну висоту  $GM$  на залежне від крену плече статичної остійності  $l(\varphi)$ :

$$K_{\varphi} = g \cdot m \cdot l(\varphi) \quad (5.15)$$

### 5.2.6 Натяг буксирної лінії

У даній роботі пружність буксирної лінії не враховується. Розрахунок натягу лінії починається при виході на задану довжину  $l_{TL}$ . Якщо відстань між точками закріплення троса на суднах менше заданої довжини, натяг  $F_T$  дорівнює нулю.

Для того щоб зусилля буксира передалося на натягнутий трос, рівнодійна сил  $R$ , створюваних буксиром повинна не дорівнювати нулю і бути спрямованою в сторону від об'єкта, що буксирується.

$$\left. \begin{aligned} F_{TX} &= 0 \text{ при} \\ R_X < 0 \vee \beta_T \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \vee x_T \geq 0 \\ R_X > 0 \vee \beta_T < -\frac{\pi}{2} \vee \beta_T > \frac{\pi}{2} \vee x_T < 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{TY} &= 0 \text{ при} \\ R_Y > 0 \vee \beta_T \in (0; \pi) \\ R_Y < 0 \vee \beta_T \in (-\pi; 0) \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Поздовжня і поперечна складові рівнодійної  $R$  передаються на трос по його напрямку, створюючи натяг  $F_T$ :

$$F_{TX} = R_X \cdot \cos \beta_T; F_{TY} = R_Y \cdot \sin \beta_T \quad (5.18)$$

$$F_T = F_{TX} + F_{TY} + F_{TV} \quad (5.19)$$

де  $F_{TV}$  – додатковий натяг, створюваний судном-об'єктом.

Сили реакції в цьому випадку виражаються як:

$$\begin{aligned}
X_T &= F_T \cdot \cos \beta_T \\
Y_T &= F_T \cdot \sin \beta_T \\
N_T &= Y_T \cdot x_T \\
K_T &= Y_T \cdot (z_T - z_G)
\end{aligned}
\tag{5.20}$$

У момент виходу буксира на довжину троса відбувається ривок, в результаті якого швидкості буксира та об'єкта, що буксирується, вирівнюються. Для того щоб трос «віртуально» не розтягувався, було введено кінематичну умову:

$$\left. \begin{aligned}
&\text{при } l_{TP} > l_{TL} - \frac{dl_{TP}}{dt} \\
&u - \frac{dl_{TP}}{dt} \cos \beta_T \\
&v + \frac{dl_{TP}}{dt} \sin \beta_T
\end{aligned} \right\}
\tag{5.21}$$

Тобто, якщо швидкість подовження троса позитивна при досягненні його максимальної довжини, вона віднімається зі швидкості буксира по відповідних осях.

### 5.2.7 Результати моделювання руху буксира

Отримана в результаті дослідження модель була реалізована у вигляді програми в середовищі Matlab Simulink R2016b. Для розрахунків був обраний буксир з тяговим зусиллям 50 тонн і розмірними (L / B / d): 32,5 / 10,8 / 4.6 м, оснащений двома азимутальними рушіями, DP = 2.544 м.

На рис. 5.5 показана циркуляція буксира з повного ходу 14,4 вузлів. Тактичний діаметр циркуляції в цьому випадку дорівнює 128 м.

Результати моделювання були звірені з даними тренажера Transas Navi-Trainer 4000 Одеського морського тренажерного центру на аналогічних моделях ASD буксирів. Кількісно і якісно поведінка моделі схожа з моделями тренажера.

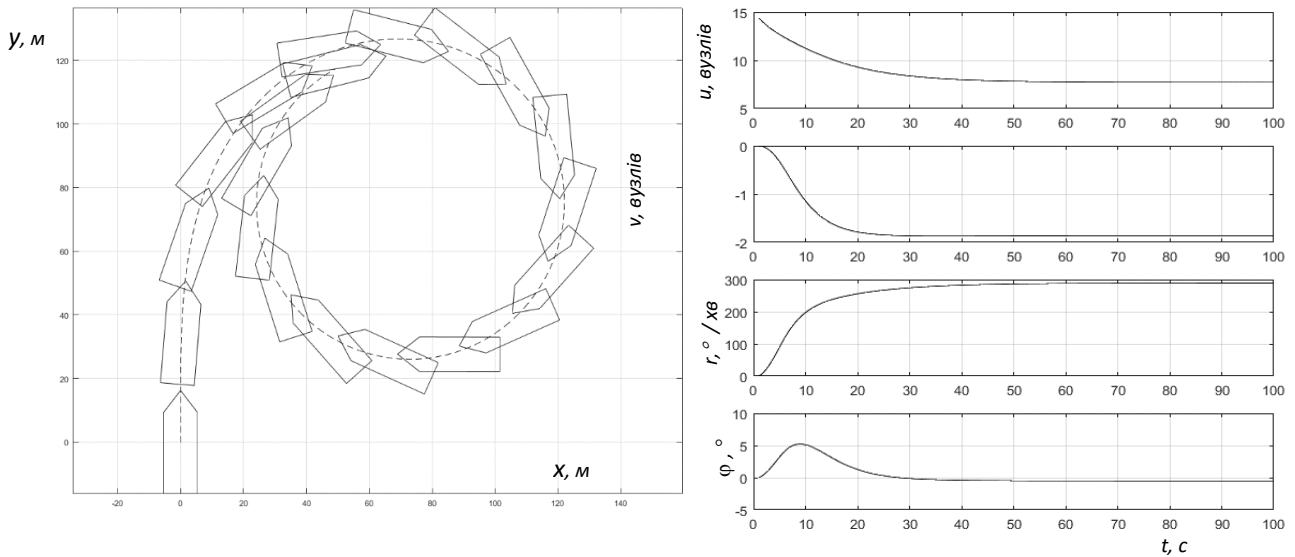


Рис. 5.5. Циркуляція ASD буксира на правий борт; розворот рушіїв:  $35^\circ$

### 5.2.8 Результати моделювання динаміки системи буксир-судно при роботі на тросі

На основі публікацій [118, 158, 219, 245, 287] автором була розроблена математична модель контейнеровоза класу панамакс розмірними (L / B / d): 282 / 32,2 / 12,2 м. Сили реакції на буксирному тросі розраховуються на базі рівнянь (5.16) - (5.20).

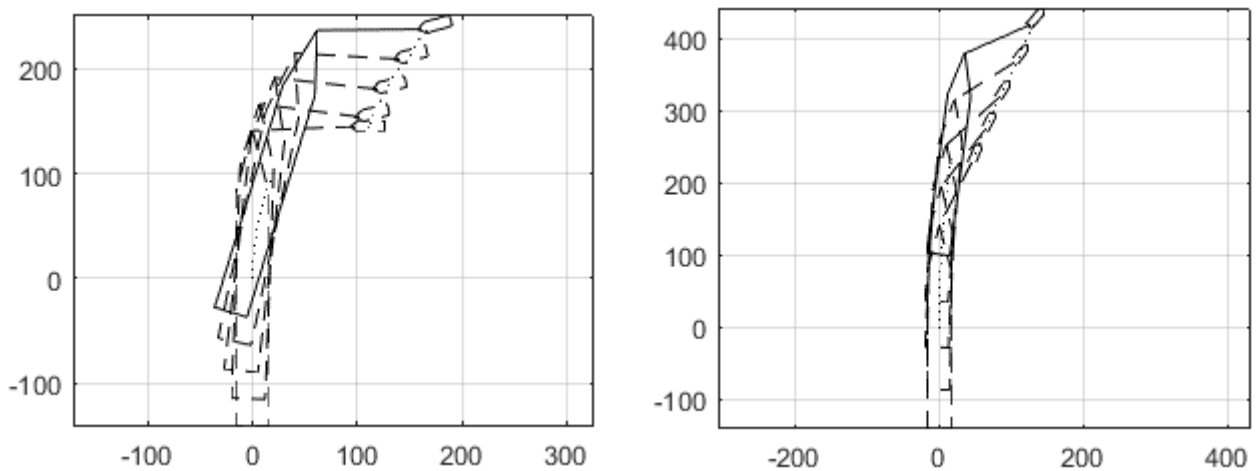


Рис. 5.6. Моделювання роботи системи буксир-судно в різних режимах: зліва – «bow-to-bow», швидкість – 2 вузла; праворуч «stern-to-bow», швидкість – 4 вузла

Результати моделювання системи буксир-судно відображені на рис. 5.6 - 5.7. На рис. 5.6 відображені різні режими буксирування. На рис. 5.7 відображена ситуація «гіртинг» зі значним накрененням буксира ( $-75^\circ$ ), що відповідає куту

закочування діаграми статичної остійності і перевищує кут затоплення ( $60^\circ$ ) для даного типу буксира, і по суті означає перекидання. Перекидання в даному випадку викликано моментом, створеним між силами упору гвинтів і натягу троса.

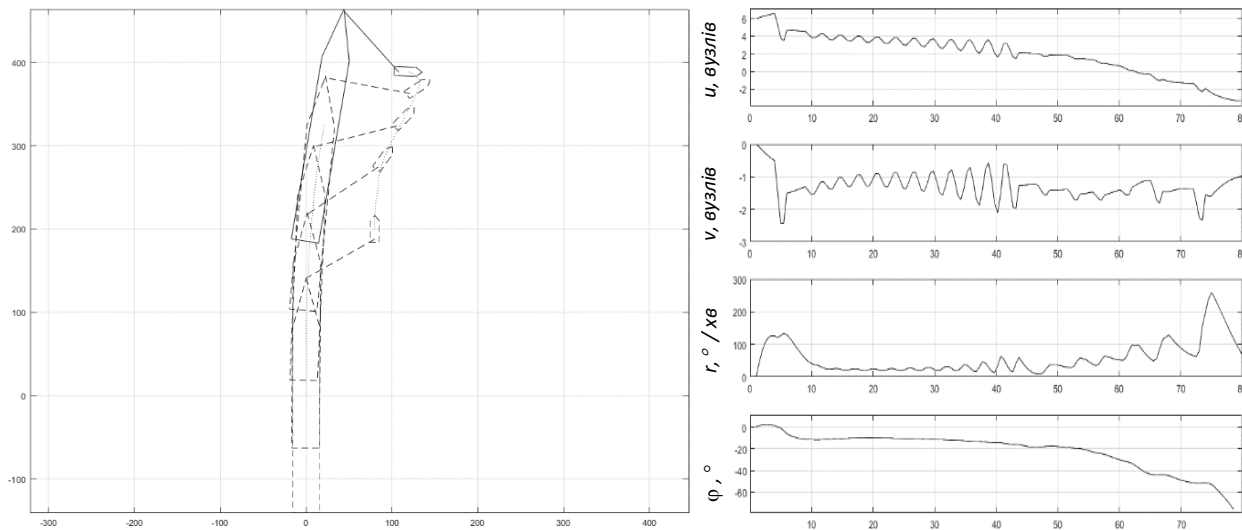


Рис. 5.7. Моделювання ситуації «гіртинг». Режим «stern-to-bow», швидкість – 6 вузлів

### 5.3 Математичне моделювання системи судно-гнучке тіло

#### 5.3.1 Система судно-гнучке тіло на прикладі сейсмічного судна

Все більшого поширення останнім часом набуває пошук вуглеводневих родовищ в морі методами сейсмічної розвідки. За даними компанії SeaBird Exploration [177] кількість суден, спеціально обладнаних для 3D сейсмічної розвідки, з 2005 року збільшилася практично в два рази (2005 р. – 42 судна, 2011 р. – 80 суден). Основною особливістю цих суден з точки зору судноводіння є те, що вони буксирують на малих швидкостях від одного до шістнадцяти спеціальних кабелів (морська сейсмічна коса) довжиною від 1,5 до 12 км, що значно обмежує їх маневрені можливості. Відповідно, це веде до підвищення вимог до судноводіїв при спостереженні за оточуючими суднами і регулюванні їх руху. Крім того, існує ряд характерних особливостей, властивих способам оцінки небезпеки зіткнення (точніше, перетину коси), які і будуть розглянуті далі.

Питання оцінки небезпеки перетину іншим судном сейсмічної коси в літературі раніше не розглядалося. Теоретичним питанням розходження суден присвячені роботи А. С. Мальцева [254], Л. Л. Вагущенко [232], С. А. Михайлова [263] та інших вчених.

Розглянемо деякі особливості управління сейсмічним судном стосовно судна з однією сейсмічною косою (рис. 5.8). Швидкість руху судна в роботі становить 3-5 вузлів, довжина коси – від 1,5 до 12 км. Судно необхідно утримувати на профілі (заданій лінії курсу) за відсутності стаціонарних навігаційних небезпек з точністю до 10 м. Сейсмічна коса, як правило, занурена на глибину до 10 м і не видна на поверхні. На кінці сейсмічної коси розташовується буй з проблісковим маячком і GPS приймачем. В умовах гарної видимості без бінокля буй видно в межах 2,5 миль.

При русі одним курсом під дією течії сейсмічна коса відхиляється від профілю на кут  $\beta$ , який, як правило, дорівнює куту дрейфу судна  $\beta^*$ . Однак під впливом вітру судно також отримує додатковий кут дрейфу, що веде до збільшення різниці  $\beta$  і  $\beta^*$ . Зважаючи на малу швидкість судна, вплив на нього вітру і течії позначається досить сильно. Так, при швидкості судна 4 вузли і течії 2 вузли у борт, кут дрейфу досягає  $25^\circ$ , що відповідно позначається і на сейсмічній косі.

Зважаючи на те, що на кінці коси і на судні встановлені GPS приймачі, кут  $\beta$  і відстань до буя  $D\beta$  розраховуються системою спостереження за параметрами коси і завжди відомі судноводію.

Згідно МППЗС 72/78 сейсмічне судно є обмеженим у можливості маневрувати. До того ж однією з першорядних задач вахтового помічника є спостереження за переміщенням навколишніх суден і, за необхідності, регулювання їх руху шляхом вказівки їм безпечних курсів проходження. Для цього вахтовий помічник повинен оцінювати не тільки небезпеку зіткнення з судном, а й небезпеку перетину коси.

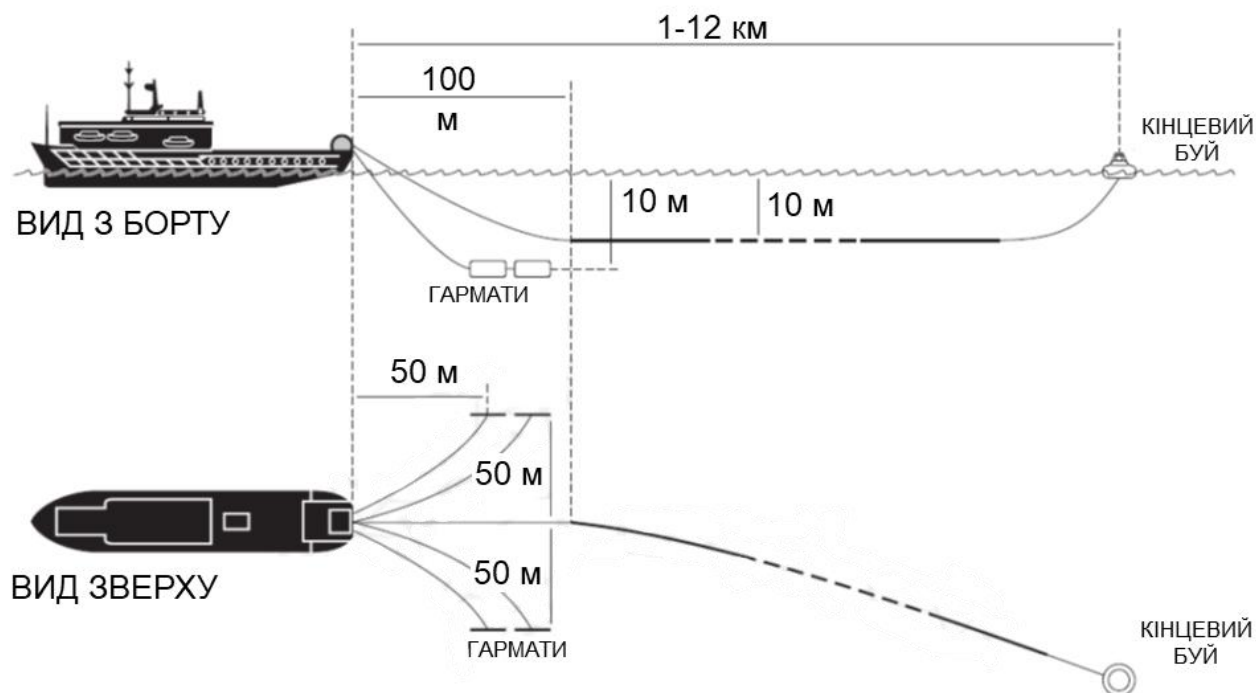


Рис. 5.8. Судно сейсмічної розвідки з одним кабелем

### 5.3.2 Математична модель судна і системи сейсмічних кіс

Зазвичай сейсмічне судно рухається прямолінійно з максимальним відхиленням від лінії маршруту ХТЕ 10 м і управляється з лабораторії сейсмічними навігаторами. В цьому випадку коса слідує за судном прямо за кормою і під дією течії відхиляється на кут, рівний куту дрейфу. Моделювання руху коси в цьому випадку стає простою геометричною задачею. Однак при зміні лінії курсу або в разі екстреного маневрування через несподівані перешкоди (рибальська сіть або судно, не нанесені на карту корали і т.д.) має бути відомо поведінку коси певної довжини і конфігурації, беручи до уваги максимально допустиму кутову швидкість, радіус повороту і критичний час на виконання маневру. Неправильний або занадто пізній маневр може призвести до контакту коси з навігаційною небезпекою, перетину кіс, посадки судна на мілину або автоматичного спливання кабелю через занурення. Перетин і занурення системи кіс відбувається через втрату натягу. Це вимагає моделювання руху коси. Через розміри модельованої системи доведеться знайти компромісне рішення беручи до уваги точність моделі і обчислювальні витрати.

Основну увагу в цьому параграфі приділено моделюванню руху гнучкого тіла, тому далі в розрахунках будемо використовувати модель повороткості судна Номото, із заданою постійною швидкістю.:

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K \delta + K T_3 \dot{\delta}, \quad (5.22)$$

$$\psi = \int r dt, \quad (5.23)$$

$$\delta = \int \min \left\{ \max \left\{ \frac{\delta_p - \delta}{T_\delta}, -\dot{\delta}_{\lim} \right\}, \dot{\delta}_{\lim} \right\} dt. \quad (5.24)$$

де  $T_1, T_2, T_3, K$  – коефіцієнти моделі судна;  $r$  – кутова швидкість судна, рад/с;  $\delta$ ,  $\delta_p$  – поточний і заданий кути перекладки стерна, рад;  $\dot{\delta}_{\lim}$  – гранична швидкість перекладки стерна, рад/с;  $T_\delta$  – постійна часу стернової машини;  $\psi$  – курс судна, рад.

Більшість досліджень в області буксируваних сейсмічних систем сьогодні присвячено системам, що буксуються біля дна, наприклад [79, 110, 165]. Повна і детальна техніка моделювання була описана Йохансеном [110]. Однак складність буксируваного масиву вимагає відповідної моделі, яка могла би відповідати як вимогам сумісності, так і обчислюваності. За основу була взята спрощена модель коси запропонована Полідоридом та ін. [165]. Двовірну модель динаміки коси, що описує рух нейтрально плавучого, нерозтяжного і гнучкого кабелю, що буксирується з постійною швидкістю в нестисливій рідині, можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial s} = -\frac{1}{2} \rho \pi d C_t V_{tr} |V_{tr}| \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = -\frac{\rho d C_n V_{nr} |V_{nr}|}{2T} \quad (5.26)$$

Кінематичні співвідношення для цієї моделі наступні:

$$\frac{\partial V_n}{\partial s} + V_t \frac{\partial \theta}{\partial s} - \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.27)$$



$$\frac{\partial V_t}{\partial s} + V_n \frac{\partial \theta}{\partial s} = 0 \quad (5.28)$$

де  $V_{tr} = V_t - u$  та  $V_{nr} = V_n - v$  нормальна і тангенціальна складові відносної швидкості кабелю відносно швидкостей води  $u$  та  $v$  по тих же осях.

Положення коси в картезіанській системі координат у кожен момент часу можна вивести з рівнянь:

$$\frac{\partial x}{\partial t}(s) = -ds \cdot \sin\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}(s) + \theta(s, t)\right) + \frac{dx_c}{dt} \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t}(s) = -ds \cdot \sin\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}(s) + \theta(s, t)\right) + \frac{dy_c}{dt} \quad (5.30)$$

де  $dx_c$  and  $dy_c$  – декартові складові потоку води створюваного течією.

Також необхідно задати граничні умови. У передній частині швидкість кабелю співвідноситься зі швидкістю буксирного судна:

$$V_t(0, t) = V_x(t) \cos \theta(0, t) + V_y(t) \sin \theta(0, t) \quad (5.31)$$

де  $V_x$  та  $V_y$  – декартові складові швидкості судна в момент часу  $t$ .

Натяг на косі поступово послаблюється к кінцю. На вільному кінці коси в кінцевій точці він повинен дорівнювати нулю, проте кінцевий буй забезпечує строго позитивний натяг, значення якого лінійно масштабується до норми швидкості:

$$T(L_s, t) = 2.57^{-1} T_L \left( V_t^2(L_s, t) + V_n^2(L_s, t) \right)^{1/2} \quad (5.32)$$

### 5.3.3 Обмеження спрощеної моделі

Крім обмеження розмірності, прийнята модель нехтує кількома явищами, що впливають на рух кабелю, такими як розтяжність, згинальні, поперечні та скручувальні сили, інерція, плавучість і прискорення. Незважаючи на це, в контексті сейсморозвідки спрощена модель забезпечує належний баланс між реалістичною симуляцією і обчислювальною простотою.

Щодо розтяжності рівняння моделі стверджують, що профіль натягу вздовж кабелю задовольняє  $T(0) \gg T(L) > 0$ . Крім того, діаметр кабелю в поєднанні з модулем Юнга дають осьову деформацію близько 0,05% від його довжини. Це передбачає подовження кабелю довжиною 6 км на 3 м, і таким чином, ігнорування пружності призводить до невеликої похибки в прогнозуванні положення коси.

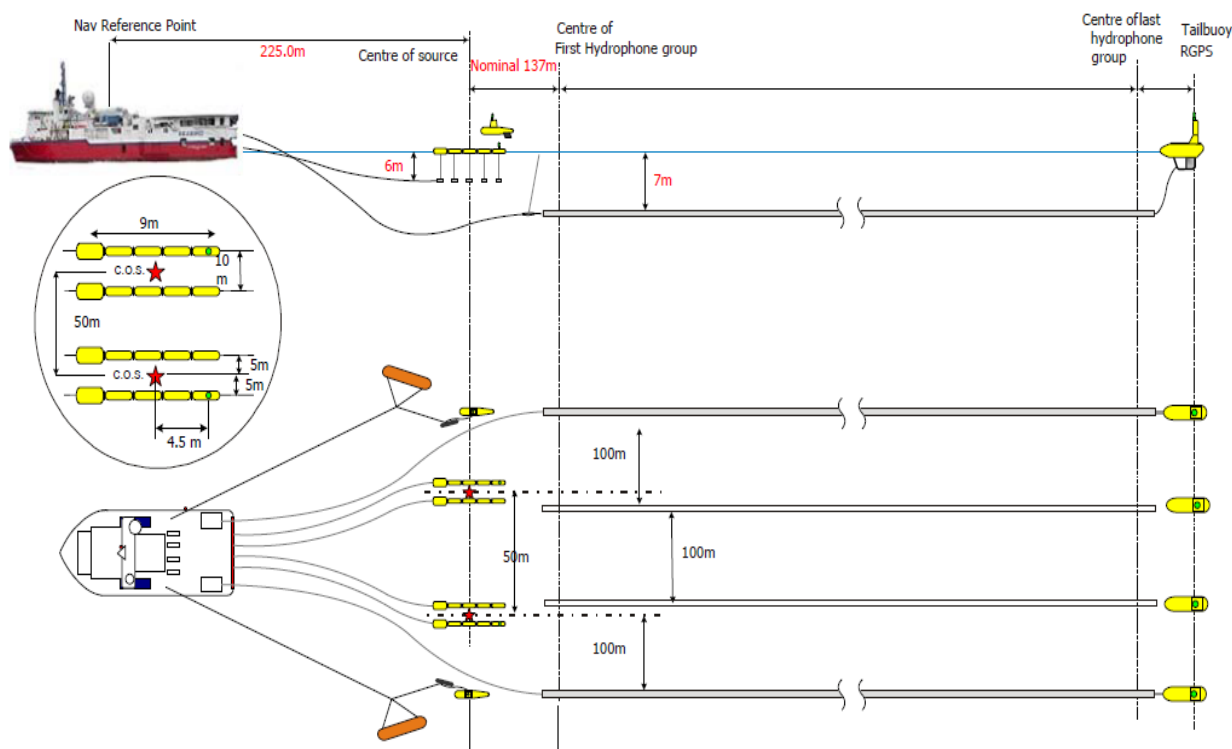


Рис. 5.9. Будова судна сейсмічної розвідки з чотирма косами. Дані надані SeaBird Exploration

Згинальні, поперечні та скручувальні сили були виключені, однак аналіз (5.32) показує, що включення згинання усуває сингулярність, викликану умовою відсутності натягу на кінці коси. Буй на кінці коси витримує натяг близько 2000 Н, і тому ніяких відхилень не проявляється. Інерційністю також нехтують, так як сила, необхідна для прискорення кабелю, значно менша в порівнянні з натягом, оскільки в реальних умовах  $d=L_S$  значно менше  $Ct$ .

Віртуальна інерція, або приєднана маса води, також ігнорується на тих же підставах і з урахуванням внутрішнього демпфірування, оскільки для розглянутих часових рамок є дуже малою.

Звичайно, обмеження руху в горизонтальній площині створює нейтральну плавучість. Це припущення порушується, якщо кабель проходить через воду різного ступеня солоності і температури, хоча реальна система включає регулятори глибини занурення, які утримують кабель поблизу поверхні. Однак для мілководних ділянок потрібно враховувати вертикальний рух кабелю, так як через втрату натягу він може зануритися на дно.

#### *5.3.4 Верифікація моделі*

Для верифікації моделі використовувалися маневрені характеристики, отримані в процесі ходових випробувань судна. Структура буксированого обладнання показана на рис. 5.9. Судно, рухаючись з середньою швидкістю 5 вузлів (2,57 м/с), буксировало 4 коси довжиною 6000 м і діаметром  $d = 0,045$  м кожна, з поперечним інтервалом 100 м. При специфікації моделі тангенціальний і нормальний коефіцієнти гідродинамічного опору були прийняті  $C_t = 0.006$  та  $C_n = 2$  відповідно до значень, запропонованих в [165]. В цілому погодні умови під час експерименту були сприятливими, течія на WNW зі швидкістю 1 вузол.

Порівняння результатів моделювання та експерименту представлено на рис. 5.10. Для кращого розрізнення показаний шлях тільки правого кінцевого буя. Слід враховувати, що маневр виконувався більше 2 годин, що призводить до помилок через невідповідності модельованих і реальних погодних умов. Максимальне відхилення кінцевого буя від прогнозованої траєкторії досягає 150 м, що цілком допустимо для тренажерної підготовки.

Необхідність в аварійному маневруванні виникає, якщо існує ризик контакту коси з навігаційною небезпекою (корал, скеля, рибальська сітка або судно і т.д.).

#### *5.3.5 Маневрування в аварійних ситуаціях*

У цьому випадку можливості маневрування дещо обмежуються. По-перше, коса зачепить небезпеку, якщо маневр занадто пізній або занадто плавний. З іншого боку, занадто різкий маневр може призвести до наступних наслідків:

- при зменшенні натягу коса занурюється глибше і може торкнутися ґрунту;
- при роботі з однією косою направляючий трос може застрягти між поплавками гармат;
- на суднах з декількома косами натяг на параванах може бути втрачений, в результаті чого коси можуть перетнутися.

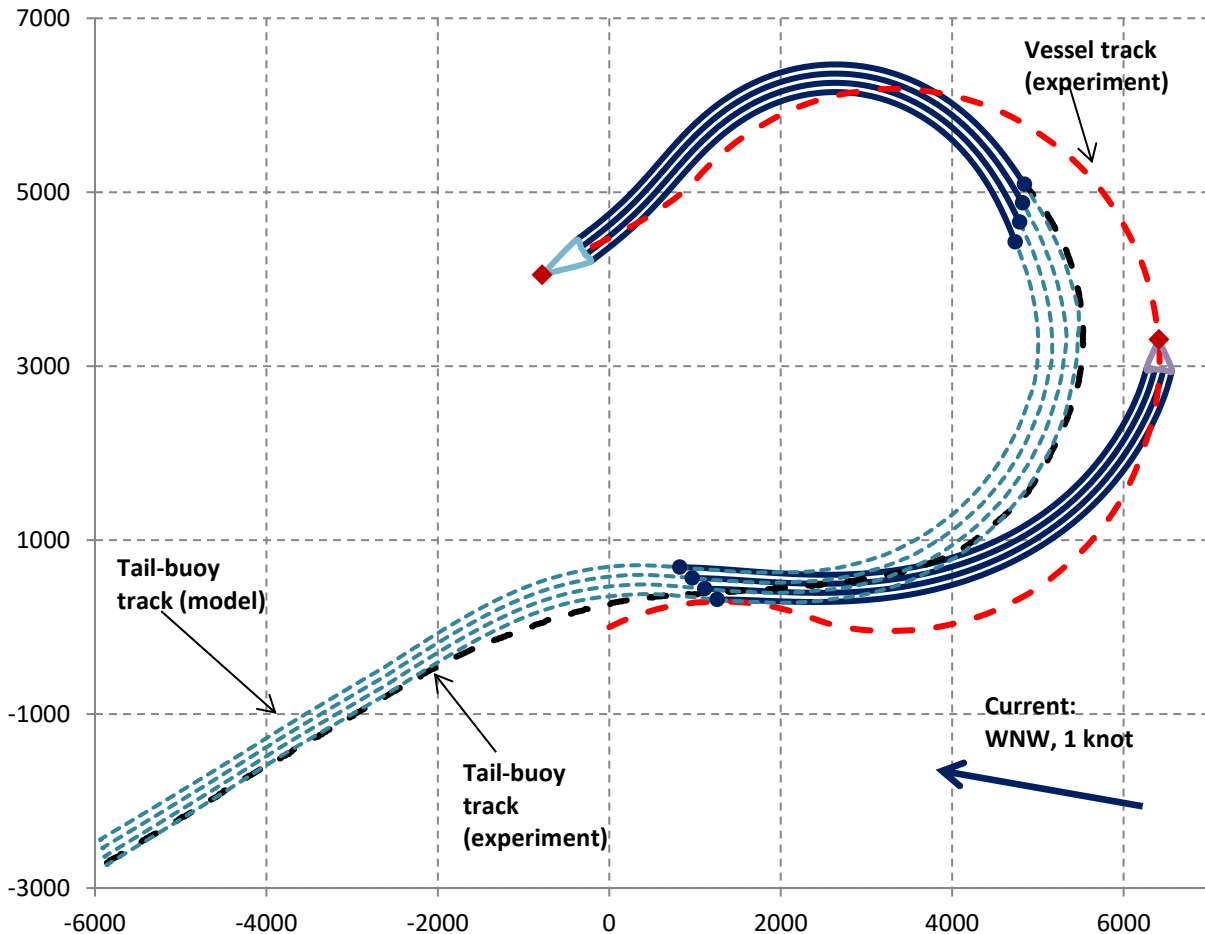


Рис. 5.10. Експериментальне підтвердження моделі судна сейсмічної розвідки

Оскільки в модель не включена будова плавучого сейсмічного обладнання, то негативні наслідки, спричиненні різким маневром можуть бути закладені тільки як обмеження кутової швидкості, отримані експериментальним шляхом. Однак є два важливих питання, на які запропонована модель може допомогти відповісти:

- Яка **мінімальна дистанція**, на якій судно може безпечно минути навігаційну небезпеку із заданим **відхиленням від траєкторії** при певній швидкості зміщення?
- або яка **мінімальна кутова швидкість** на певній дистанції і з косою певної довжини, за якої судно може уникнути навігаційної небезпеки?

Для уникнення небезпеки переважно вдаються до зміщення, оскільки це може дати можливість не переривати лінію профілю. Таким чином, перед відхиленням від лінії профілю потрібно оцінити необхідне зміщення і його доцільність. Судно має зміститися в задану позицію з обмеженою поперечною швидкістю зміщення  $VC_V$ . В першу чергу оцінюється відхилення від лінії профілю  $\Delta COG$  (рис. 5.11):

$$\Delta COG = \arcsin \frac{VC_V}{SOG} \quad (5.33)$$

Відстань, на якій судно зможе розійтися з навігаційною небезпекою  $DC_V^H$ , можна визначити:

$$DC_V^H = VC_V \cdot T_H - DC_H \quad (5.34)$$

Час на обхід небезпеки судном  $T_V$  і кінцевим буєм  $T_{TB}$  визначається:

$$T_V = DA_V^H / VA_V; T_{TB} = (DA_V^H + L_S \cdot \cos \beta) / VA_V \quad (5.35)$$

Дистанція проходження кінцевого буя розраховується з урахуванням того, що кінцевий буй може мати власну поперечну швидкість  $VC_{TB}$  внаслідок зміни течії з часом.

$$DC_{TB}^H = L_S \cdot \sin \beta + DC_V^H + VC_{TB} \cdot T_{TB} \quad (5.36)$$

Судно **безпечно пройде небезпеку**, якщо  $DC_V^H$  та  $DC_{TB}^H$  **не дорівнюють нулю і мають позитивне значення**. З практичної точки зору для визначення мінімальної дистанції безпечного проходження небезпеки потрібно враховувати запас часу.

Якщо  $T_{TB}$  недостатньо для отримання бажаного відхилення, то **профіль переривається і виконується аварійний маневр**. У цьому випадку через велику кількість факторів, які впливають на косу під час маневру, простих розрахунків недостатньо. Однак тренажерна практика може допомогти навігаційній команді і сейсмичним навігаторам оцінити необхідність зміщення і те, коли слід здійснювати аварійний маневр.

Термін «**аварійний маневр**» в певному випадку означає поворот на  $90^\circ$  в сторону від небезпеки і, якщо вигідно, в сторону коси.

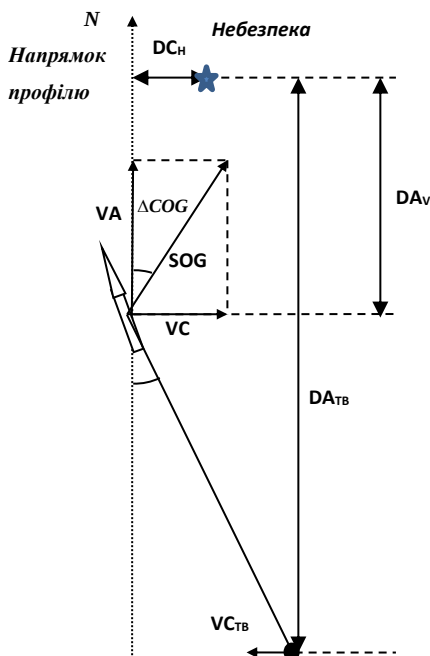


Рис. 5.11. Визначення зміщення

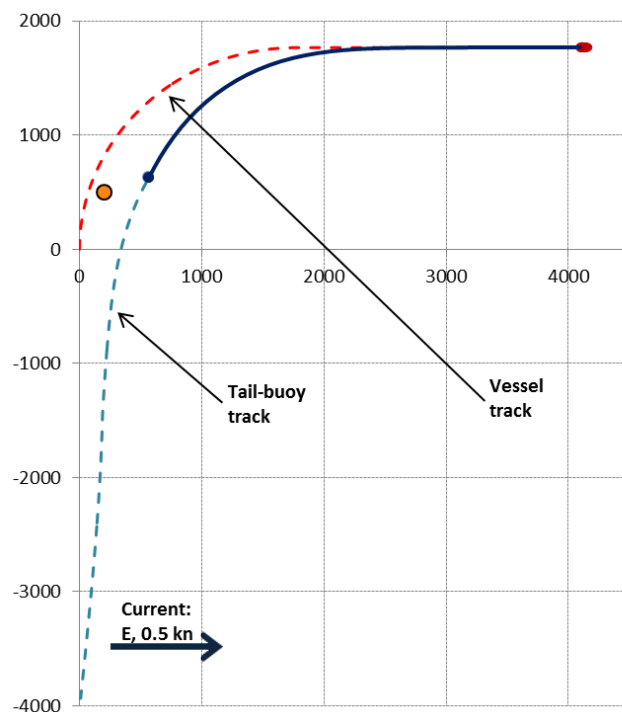


Рис. 5.12. Виконання аварійного маневру

На рис. 5.12 показано судно, що буксирує одну косу довжиною 4 км зі швидкістю 5 вузлів. Небезпека знаходиться на відстані 500 м на північ і 200 м на схід від судна. Швидкість течії 0,5 вузла на схід. Судно повернуло на  $90^\circ$  зі швидкістю  $5^\circ/\text{хв}$  і пройшло небезпеку на дистанції 250 м. Щоб уникнути небезпеки, задаючи зміщення, потрібно відхилитися від лінії шляху на  $23^\circ$ , що вимагає мінімальної  $VC_v$  2 вузла, що в свою чергу неприйнятно для продовження руху за лінією профілю.

## 5.4 Зворотна задача розходження суден обмежених у маневруванні

### 5.4.1 Оцінка небезпеки зіткнення і оцінка небезпеки перетину

Розглянемо задачу: до сейсмічного судна  $A$  з відомим вектором руху  $\bar{V}_A$  і довжиною коси  $l_{KC}$ , що має кут дрейфу відносно лінії профіля  $\beta$ , наближається судно  $B$ , що спостерігається за радіолокатором. Необхідно: визначити небезпеку зіткнення і небезпеку перетину коси.

Графічно ця задача вирішується, як показано на рис. 3.36.

Відповідно до роботи [263], найкоротшу дистанцію розходження  $D_{кр}$  можна визначити за формулою:

$$CPA = \frac{D_1 D_2 \sin \varepsilon}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 D_2 \cos \varepsilon}} \quad (5.37)$$

де  $D_1, D_2$  – дистанції до судна  $B$  у моменти часу 1 і 2 (проміжок часу, як правило – 6 хв);  $\varepsilon$  – кут між пеленгами в моменти часу 1 і 2.

Як видно з рис. 5.13, небезпеки зіткнення, в даному випадку, немає.

Дистанцію перетину по кормі (ARC), як правило, можна дізнатися за даними супроводжуваної цілі ЗАРП – вона зворотна по знаку дистанції перетину по носу (BCR). Однак при розрахунках в сучасних ЗАРП в якості параметрів руху власного судна в основному приймаються  $COG_A$  та  $V_A$  (курс і швидкість відносно ґрунту), одержувані з GPS. Зважаючи на це, при наявності у судна значного дрейфу можлива ситуація, коли за даними ЗАРП судно-ціль проходить по кормі чисто, а насправді, існує небезпека перетину коси. Тому замість цього слід визначити дистанцію проходження коси  $ACR_S$ .

З рис. 5.13 (б) визначимо параметри цілі і допоміжні величини. Щоб визначити параметри цілі необхідно знайти проекції вектора відносного руху на осі координат:

$$\begin{aligned} D_x &= D_1 \sin Q_1 - D_2 \sin Q_2 \\ D_y &= D_1 \cos Q_1 - D_2 \cos Q_2 - V_A \end{aligned} \quad (5.38)$$

де  $Q = B - C_A$  – курсовий кут на ціль.

Швидкість цілі  $V_B$  визначається за формулою:

$$V_B = \sqrt{D_X^2 + D_Y^2} \quad (5.39)$$

Курс цілі  $C_B$  (з урахуванням переходу від картезіанської системи координат до навігаційної) визначається за наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \arcsin D_x / D_{xy}, \text{ if } D_x \geq 0, D_y \geq 0 \\ \psi &= \frac{\pi}{2} + \arcsin |D_y| / D_{xy}, \text{ if } D_x \geq 0, D_y \leq 0 \\ \psi &= \pi + \arcsin |D_x| / D_{xy}, \text{ if } D_x \leq 0, D_y \leq 0 \\ \psi &= \frac{3\pi}{2} + \arcsin D_y / D_{xy}, \text{ if } D_x \leq 0, D_y \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.40)$$

$$\left. \begin{aligned} COG_B &= \psi + COG_A + \pi, (\psi + COG_A + \pi) < 2\pi \\ COG_B &= \psi + COG_A - \pi, (\psi + COG_A + \pi) > 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

де  $RC$  – напрямок ЛВР (лінії відносного руху).

Дистанцію перетину по кормі  $ARC$  можна знайти за формулою:

$$ACR = \frac{CPA}{\sin \alpha} \cdot \text{sign}((Q_2 - Q_1) \cdot \sin Q_2) \quad (5.42)$$

$\alpha$  – кут між ЛВР і лінією шляху судна, який розраховується за формулою:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \pi + RC - COG_A, \text{ if } \pi + RC \geq COG_A \\ \alpha &= 2\pi + RC - COG_A, \text{ if } \pi + RC < COG_A \end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

Функція  $\text{sign}((Q_2 - Q_1) \cdot \sin Q_2)$  в даному випадку визначає знак дистанції перетину, в залежності від тенденції зміни пеленга і борту, з якого знаходиться судно-ціль: «+» – по кормі, «-» – по носу.

Кут відхилення коси від лінії профілю розраховується за формулою:

$$\beta = SLC - BRT; \beta \in (0, \pi/2) \quad (5.44)$$

де  $SLC$  – курс на лінії профілю,  $BRT$  – істинний пеленг з судна на кінцевий буй.

Застосувавши теорему синусів, отримаємо:



$$\frac{L_s + ACR_s}{\sin \alpha} = \frac{ACR}{\sin \gamma} \quad (5.45)$$

$$\gamma = \pi - (\alpha + \beta) \quad (5.46)$$

Після перетворення отримаємо:

$$ACR_s = \frac{ACR}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot \sin \alpha - L_s \quad (5.47)$$

При цьому, якщо  $ACR_s < 0$  та  $|ACR_s| \leq L_s$  – існує небезпека перетину коси;  
якщо  $|ACR_s| > L_s$  – ціль не перетинає косу;

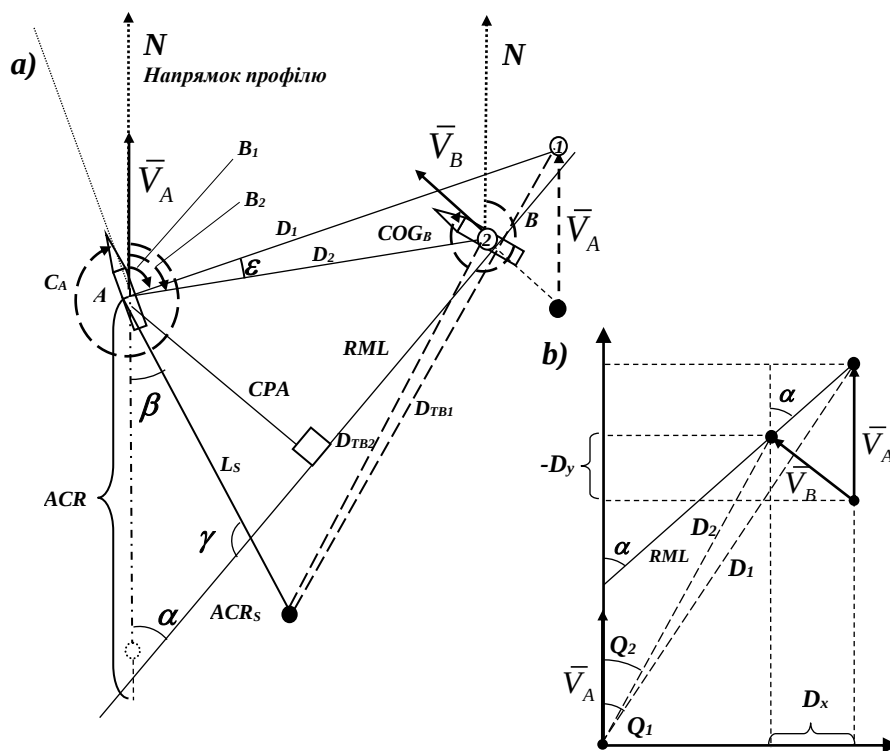


Рис. 5.13. Рис. 3.2. Визначення параметрів цілі і зближення

Звичайно, при вирішенні задачі розходження, необхідно враховувати похибки вимірювань локатора та інших приладів і вибирати дистанції по кормі з певним запасом.

Даний метод розрахунку може бути реалізований в ЗАРП, які встановлюються на сейсмічних суднах. На звичайному локаторі небезпеку перетину коси можна оцінювати шляхом установки електронного візира

напрямку (ЕВН) в сторону коси, а кола дальності за довжиною коси і подовженню ЛВР до перетину з ЕВН.

#### 5.4.2 Визначення нового курсу судна-цїлі

У цьому випадку вахтовому помічнику необхідно вирішити задачу, відмінну від звичайного уникнення зіткнення, так як власне судно необхідно утримувати на заданому профілі, і регулювати маневрування судна-цїлі. Якщо судно-цїль проходить по носу, то ця задача має класичне рішення, відоме з літератури. Якщо цїль проходить по кормі, то ця проблема повинна бути вирішена з урахуванням напрямку коси.

Розглянемо метод розрахунку нового курсу судна-цїлі. Задаються наступні умови: маневр повинен виконуватися в момент часу, що ділиться на три кратних інтервали вимірювання, таким чином, що судно-цїль пройде позаду коси на мінімальній заданій відстані від кінцевого буя  $CRA_{TB}$ .

Щоб знайти  $CRA_{TB}$  потрібно визначити пеленги і дистанції з кінцевого буя на цїль. Як показано на рис. 3.43, дистанцію від кінцевого буя до цїлі можна розрахувати з трикутника, утвореного косою і лініями пеленга на цїль за теоремою косинусів:

$$D_{TB1} = \sqrt{D_1^2 + L_S^2 - 2D_1L_S \cos(\pi - B_1 - \beta)} \quad (5.48)$$

$$D_{TB2} = \sqrt{D_2^2 + L_S^2 - 2D_2L_S \cos(\pi - B_2 - \beta)} \quad (5.49)$$

Отже, пеленги визначаються за теоремою синусів:

$$B_{TB1} = COG_A - \beta + \arcsin\left(\frac{D_1 \sin(\pi - B_1 - \beta)}{D_{TB1}}\right) \quad (5.50)$$

$$B_{TB2} = COG_A - \beta + \arcsin\left(\frac{D_2 \sin(\pi - B_2 - \beta)}{D_{TB2}}\right) \quad (5.51)$$

На основі рівняння (5.37) дистанцію найкоротшого зближення  $CRA$  з кінцевим буюм можна розрахувати:

$$CPA_{TB} = \left| \frac{D_{TB1} D_{TB2} \sin(B_{TB2} - B_{TB1})}{\sqrt{D_{TB1}^2 + D_{TB2}^2 - 2D_{TB1} D_{TB2} \cos(B_{TB2} - B_{TB1})}} \right| \quad (5.52)$$

Дистанція від власного судна до цілі у третій момент часу можна визначити наступним чином:

$$D_3 = \sqrt{D_2^2 + \Delta D^2 - 2D_2 \Delta D \cos \mu} \quad (5.53)$$

Де  $\mu = \pi + B_2 - RC$ ;  $\Delta D$  – дистанція між точками спостереження 1 і 2, розрахована наступним чином:

$$\Delta D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 D_2 \cos \varepsilon} \quad (5.54)$$

Дистанція від кінцевого буя до цілі у третій момент часу можна визначити наступним чином:

$$D_{TB3} = \sqrt{\Delta D^2 + D_{TB2}^2 - 2\Delta D \cdot D_{TB2} \cdot \cos(\pi + B_{TB2} - RC)} \quad (5.55)$$

Довжина нової лінії відносного руху у третій момент часу до точки перетину коси визначається за формулою:

$$RML_N = \sqrt{D_3^2 + (L_S + ACR_{SN})^2 - 2D_3 (L_S + ACR_{SN}) \cos(\pi + COG_1 - B_2 - \beta - \varepsilon^*)} \quad (5.56)$$

$$\varepsilon^* = \arcsin\left(\frac{\Delta D \sin \mu}{D_3}\right) \quad (5.57)$$

Як видно з рис. 5.14, щоб розрахувати новий курс судна-цілі, треба визначити кут  $\alpha^*$ .

$$\alpha^* = \alpha + \Delta\alpha \quad (5.58)$$

$$\Delta\alpha = -\arcsin\left(\frac{CPA_{TBN}}{D_{TB3}}\right) - \text{sign}(ACR_S) \cdot \arcsin\left(\frac{CPA_{TB}}{D_{TB3}}\right) \cdot \text{sign}(\sin Q_2) \quad (5.59)$$

Знаючи  $\Delta\alpha$ , нову дистанцію перетину по кормі  $ACR$  для коси можна визначити як:



*Висновки за розділом 5*

У результаті проведеного дослідження розроблена математична модель системи буксир-судно пов'язаної тросом. В якості буксира обрано судно з двома азимутальними рушіями, модель якого побудована в чотирьох ступенях свободи з урахуванням його поперечної остійності, та впливу куту розвороту та обертів гвинту рушіїв на їх ефективність під час сумісної роботи.

Розроблено математичну модель системи судно-гнучке тіло на прикладі судна сейсмічної розвідки. Проведено аналіз процесу розходження судна сейсмічної розвідки з кабелем великої довжини з іншими суднами. Запропоновано алгоритм рішення зворотної задачі розходження суден на прикладі оцінки небезпеки перетину сейсмічної коси.

Даний алгоритм може бути інтегрований в засоби автоматичної радіо прокладки (ЗАРП) для суден, обмежених у можливості маневрувати, та які буксирують інші об'єкти на тросі великої довжини.

## РОЗДІЛ 6. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА НАВІГАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

### 6.1 Оцінка небезпеки зіткнення чи навалу

Аналіз розслідувань зіткнень (рис.1.20) показує, що у більшості випадків аварії відбувалися або в результаті неправильного рішення судноводія, або через недостатню оцінку ситуації [59, 132, 270]. Це також було підтверджено результатами оцінки дій судноводіїв при відтворенні аварійної ситуації на тренажерах [283]. Часто простежується ситуація, коли судноводії продовжують вести радіопереговори, незважаючи на те, що зіткнення вже не можна уникнути.

Це, в свою чергу, означає, що судноводії не усвідомлюють настання ситуації *маневру останнього моменту* (МOM). «Останній момент» практично характеризує поріг часу, після проходження котрого зіткнення відбудеться незалежно від вживаних дій.

Дослідження та рекомендації щодо визначення «останнього моменту» наведені в ряді публікацій [132, 145, 233, 248].

У статті [233] показана математична модель для ситуації зближення суден на пересічних курсах. У роботі [233] наведені методи розрахунку геометричних параметрів маневру та рекомендації щодо вибору MOM: циркуляція на лівий або правий борт, гальмування. У роботі [248] запропоновано емпіричний спосіб оцінки ситуації небезпечного зближення.

Однак в цих публікаціях при розрахунку геометричних параметрів маневру значення швидкості маневруючого судна вважається постійним, в той час як на циркуляції швидкість зменшується практично в два рази, що впливає і на час, і на дистанцію розходження. Розміри суден також мають критичне значення при розходженні на близьких дистанціях, особливо враховуючи те, що сучасні великотоннажні судна досить часто мають довжину 300-400 метрів. Найбільш коректно це враховано в роботі [145], де зіткнення визначається з умови перетину двох геометричних областей, які характеризують судна. Водночас всі розрахунки в роботі [145] були отримані в істинному русі, а основним

параметром при розрахунках є мінімальна дистанція між суднами. У такому випадку значно збільшується кількість можливих сценаріїв розвитку ситуації розходження, що, відповідно, призводить до значного збільшення ітерацій і погіршення точності в роботі алгоритму визначення ймовірності зіткнення.

У роботі [248] оцінка небезпечної ситуації проводиться відносно прогнозованої точки зіткнення, що є більш коректним, проте функція визначення мінімальної дистанції до цієї точки залежить тільки від довжини і швидкості судна, що не дозволяє врахувати його маневрені характеристики.

Визначення «останнього моменту» і «дистанції небезпечного зближення» є важливим не тільки для того, щоб позначити судноводію момент початку виконання аварійного маневру, але і, в залежності від маневрених властивостей і розмірів судна, провести оцінку ситуації загалом і визначити безпечну дистанцію та час найкоротшого зближення, що на сьогоднішній день є можливим завдяки даним, одержуваним з АІС (автоматичної ідентифікаційної системи).

У правилах запобігання зіткненню МППЗС [41] наведено термін *close quarters* – *небезпечне зближення*. Однак офіційне визначення цього терміну в публікаціях ІМО не наводиться.

Буде логічно зробити висновок, що МОМ виконується в ситуації небезпечного зближення суден, при цьому *останній момент* – момент часу, після якого зіткнення відбудеться незалежно від вживаних дій.

Звідси, *маневр останнього моменту (МОМ)* – *маневр, що призводить до розходження суден на найкоротшій дистанції, яка прагне до нуля.*

МОМ можна розділити на два види:

- *одиначний* – маневр, що здійснюється одним судном, за умови, що інше зберігає курс і швидкість;
- *взаємний* – маневр, що здійснюється обома суднами.

Схема виконання МОМ показана на рис. 6.1.

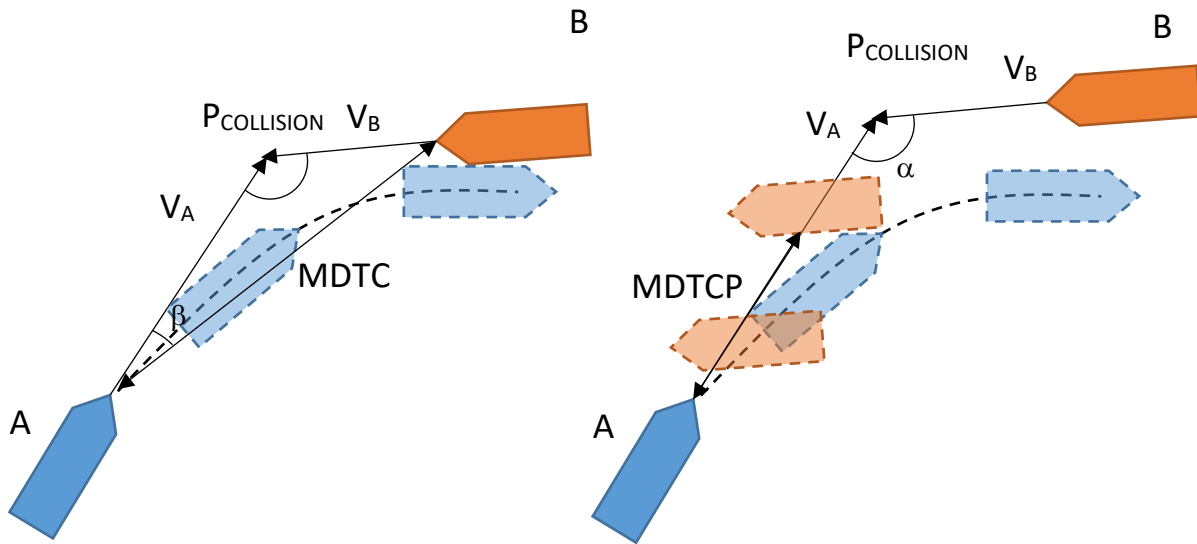


Рис. 6.1. Маневр останнього моменту. Зліва – істинний рух. Праворуч – визначення MDTCP шляхом віддалення судна B за курсом судна A

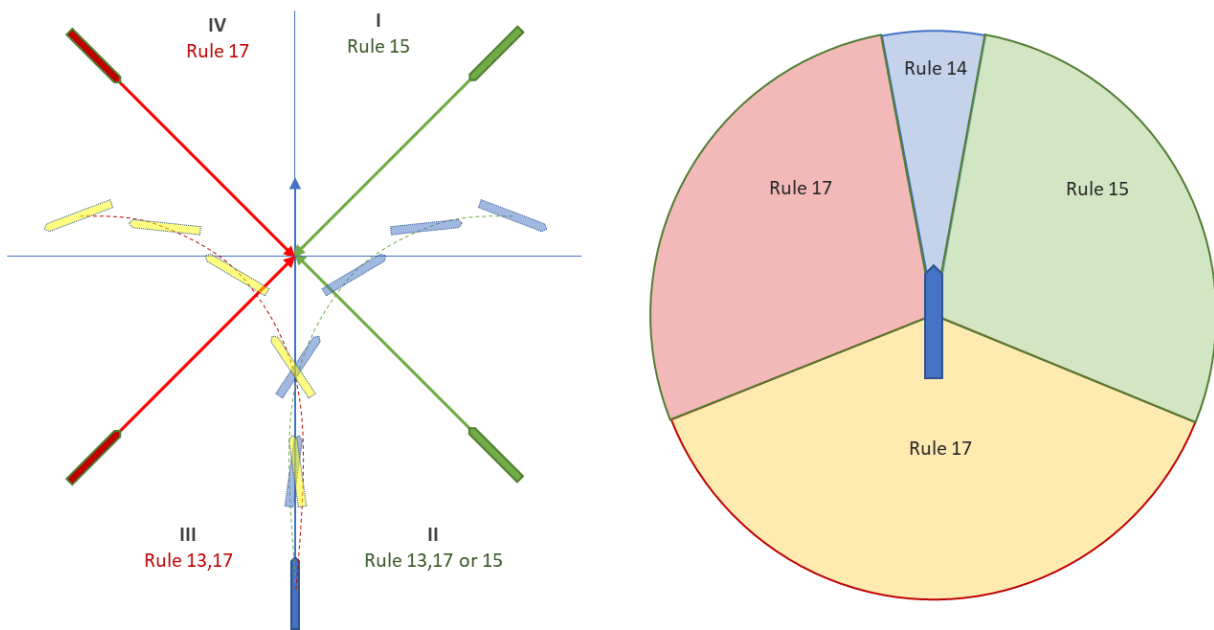


Рис. 6.2. Маневр останнього моменту у перспективі правил МППЗС

Для програмної реалізації алгоритму оцінки небезпеки зіткнення з урахуванням розмірів судна справедливо буде наступне:

Лема 1: *небезпека зіткнення існує, якщо пеленг  $\beta$  на інше судно з плином часу не змінюється, при швидкості зближення суден  $V_{\text{COLLISION}}$  не рівній нулю.*



Лема 2: *зіткнення* суден  $A$  і  $B$ , визначених відповідними множинами точок настає, коли  $A \cap B$ .

Якщо судна маневрують, тоді *зіткнення* суден  $A$  і  $B$ , визначених відповідними множинами точок настає, коли геометричні множини точок їх траєкторій  $AA \supset A$  і  $BB \supset B$  перетинаються:  $AA \cap BB$ .

За умови, що після початку маневру судно не змінює задані параметри управління (наприклад, кут перекладки стерна або оберти гвинта), його траєкторія на тихій воді буде незмінною.

Також слід враховувати наступне:

- Маневр циркуляції є набагато більш ефективним, ніж маневр активного гальмування. Так висув на циркуляції відповідно до стандартів ІМО [97] повинен бути не більше  $4.5-5L$  ( $L$  – довжина судна), в той час як дистанція активного гальмування – не більше  $15-20L$ .
- Параметри циркуляції з усталеного режиму ходу мало залежать від швидкості судна [132]. Так різниця між висувом на повному і малому ходу становить близько 10-15%.

Згідно з МППЗС і прийнятою практикою судноводіння кращим маневром у більшості випадків, особливо в разі маневру останнього моменту, є відворот вправо. З іншого боку, з результатів математичного моделювання (рис. 4. б і г) видно, що при маневрі у бік судна-цілі (рис. 3, чверті II і IV) зіткнення може відбутися не в прогнозованій зоні найкоротшого зближення, а далі по траєкторії руху відвертаючого судна. Слід зазначити, що водночас Правило 15 не забороняє відворот вліво для судна, що поступається дорогу, а Правило 17 забороняє *«змінювати курс вліво, якщо інше судно знаходиться зліва від нього»*.

Отже, для судна-цілі, що знаходиться в II-й чверті, логічно віддати перевагу маневру вліво у бік від нього. Судно-ціль, що знаходиться в IV-й чверті, зобов'язане слідувати Правилу 15 і може почати відвертати вправо, що в підсумку може призвести до зіткнення поза прогнозованої зони найкоротшого зближення. Відповідно, в чвертях I, III, IV маневр останнього моменту необхідно виконувати вправо.

У статті [145] автори застосовують моделі динаміки суден без урахування збурюючих впливів. Судна віддаляються одне від одного, поки їх траєкторії і геометричні множини відносно цих траєкторій не будуть перетинатися. Мінімальна відстань між суднами MDTC (minimum distance to collision) є функцією швидкості взаємного зближення суден  $V_{\text{COLLISION}}$ , кута перетину курсів  $\alpha$ , масиву параметрів маневру  $M$  і розмірів суден:

$$\text{MDTC} = f(V_{\text{COLLISION}}, \alpha, M, BB, AA) \quad (6.1)$$

Масив  $M$  характеризує параметри управління судном в найзагальнішому випадку – кут перекладки стерна  $\delta$  і режим ходу  $n$ .

Якщо  $\alpha = 0$  – курси суден співпадають, якщо  $\alpha = 180$  – курси суден протилежні.

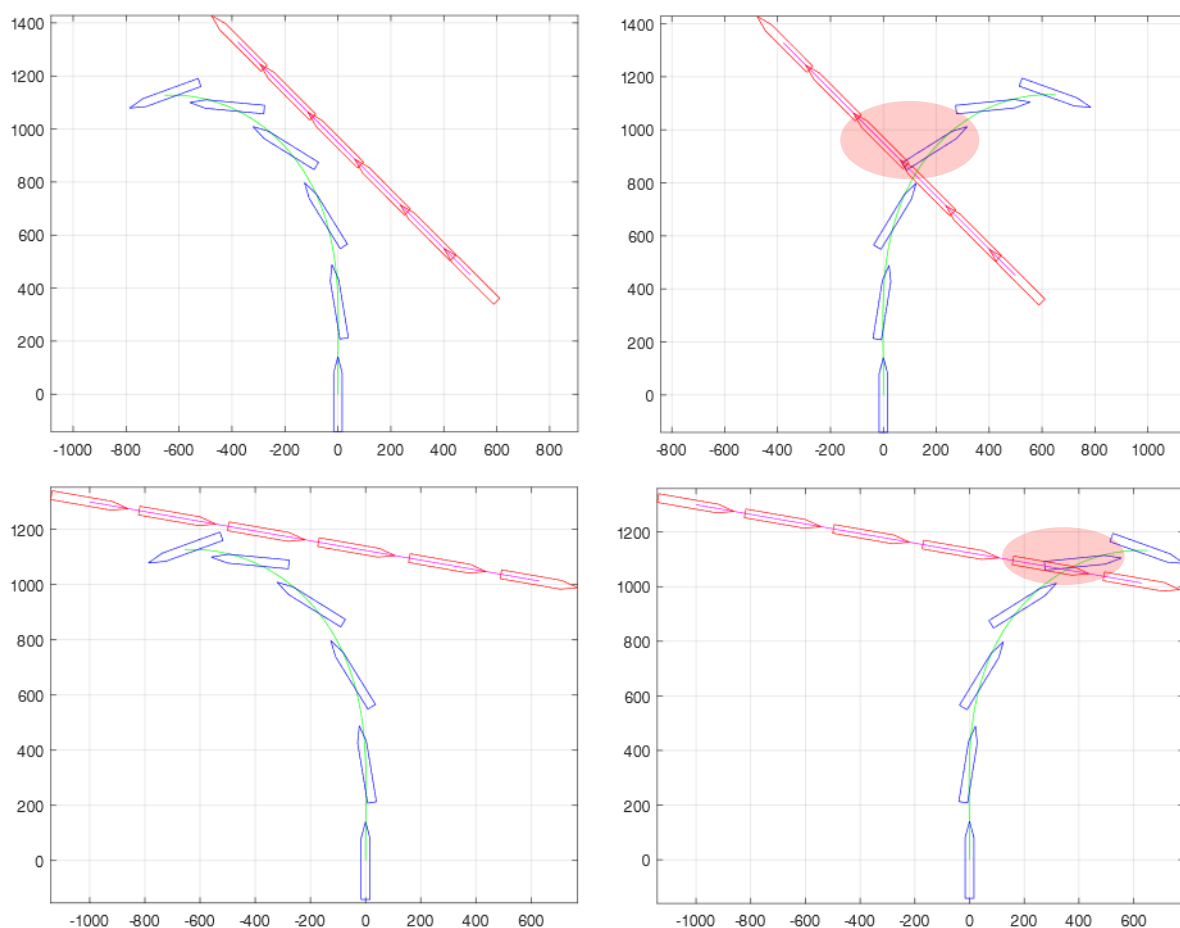


Рис. 6.3. Відхилення від судна циркуляцією з перекладкою стерна на борт

Такий підхід не дозволяє отримати однозначного вирішення задачі, так як при одному значенні MDTC, але різних швидкостях зближення суден, небезпеки зіткнення може не бути.

За умови сталості траєкторій обох суден задачу визначення MDTC у роботі [273] запропоновано вирішувати відносно точки передбачуваного зіткнення, від початку визначаючи дистанцію до цієї точки MDTCP (*minimum distance to a collision point*).

MDTCP – мінімальна дистанція до розрахункової точки зіткнення, на якій планований маневр буде ефективним; геометрично визначається як відстань між найближчими одна до одної точками множин  $A$  і  $B$ .

*Теорема.* Якщо небезпека зіткнення існує, і маневр виконується одним судном, для одного значення мінімальної дистанції до точки зіткнення  $MDTCP(\alpha, M, B, AA)$  існує множина  $MDTC(V_A, V_B)$ .

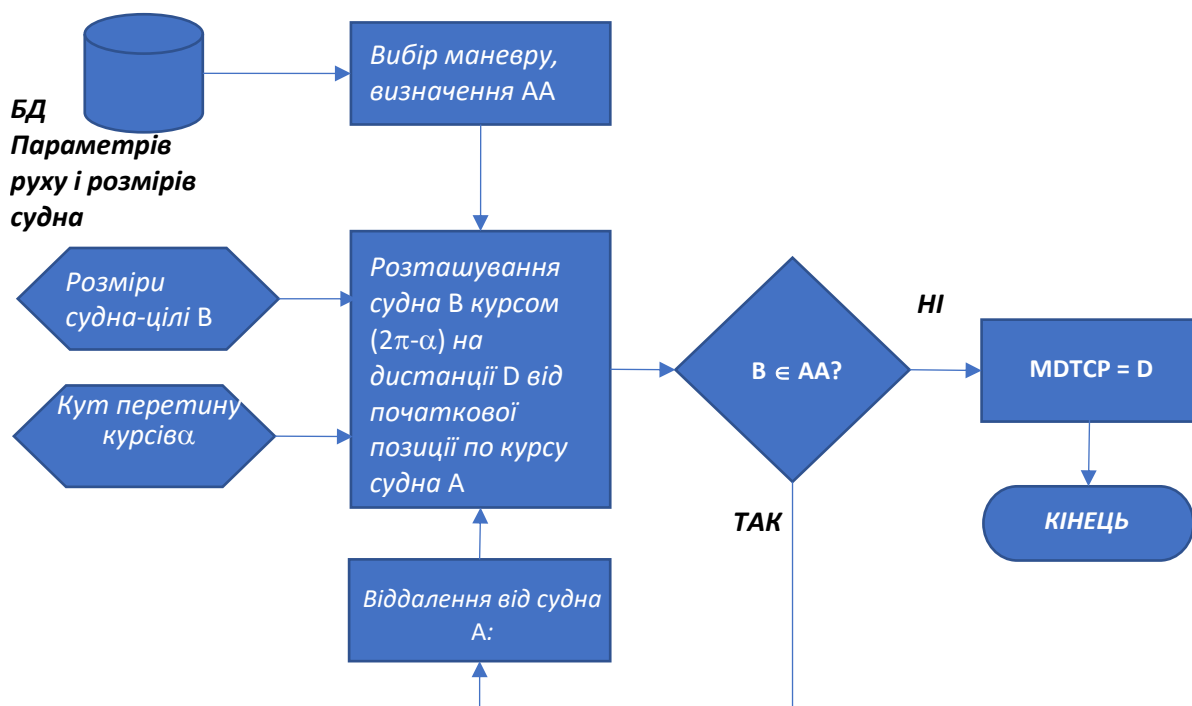


Рис. 6.4. Блок-схема алгоритму програми визначення MDTCP

У разі *одиначного* маневру судно-ціль зберігає свої курс та швидкість. Таким чином, буде справедливим твердження, що, незалежно від маневру судна  $A$ , судно  $B$  опиниться в прогнозованій точці зіткнення  $P_{COLLISION}$  з курсом  $\psi_B$ .

Для того щоб знайти MDTCP, завдання вирішується інверсним способом від моменту зіткнення (рис. 6.1). Судно В під кутом  $\alpha$  розташовується у початковій позиції судна А, а потім віддаляється за курсом судна А з кроком  $\alpha$  до тих пір, поки множина точок АА не перестане перетинатися з В. Дистанція між початковою позицією судна А і позицією судна В, в якій  $V \notin AA$  визначається як MDTCP.

У даному випадку при вирішенні задачі немає необхідності враховувати швидкість руху суден:

$$MDTCP = f(\alpha, M, B, AA) \quad (6.2)$$

Дві досліджувані дистанції пов'язані між собою як:

$$MDTC = MDTCP \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (6.3)$$

Умова зіткнення суден передбачає, що істинні вектори руху суден зімкнуться в одній точці  $P_{COLLISION}$ . Звідси, швидкість взаємного зближення визначається за теоремою косинусів:

$$V_{COLLISION} = \sqrt{V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos \alpha} \quad (6.4)$$

Оскільки курсовий кут  $\beta = \text{const}$ , незалежно від відстані між суднами:

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{V_B \sin \alpha}{V_{COLLISION}} \right) \quad (6.5)$$

Звідси, для одного значення MDTCP існує множина MDTC( $V_A, V_B$ ).

Алгоритм програми визначення MDTCP наведено на рис. 5.

Для того щоб реалізувати описаний метод визначення мінімальної дистанції до точки зіткнення, в середовищі Matlab Simulink R2016b автором була написана відповідна програма. Розрахунки були проведені для контейнеровоза класу панамакс (довжина – 282 м, ширина – 32 м, осадка – 12.2 м). Криві циркуляцій були отримані методом математичного моделювання маневрування судна на площині на базі робіт [162, 163] та звірені з даними маневреного буклету. Параметри циркуляцій наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Параметри циркуляції контейнеровоза класу панамакс

| Параметр \ Кут перекладки стерна            | 10°  | 20°  | 35°  |
|---------------------------------------------|------|------|------|
| Висув, м                                    | 1495 | 1128 | 930  |
| Тактичний діаметр, м                        | 1971 | 1470 | 1152 |
| Початкова швидкість, вузлів                 | 24   | 24   | 24   |
| Швидкість на момент повороту на 90°, вузлів | 18.9 | 16.7 | 14.5 |

Перетин двох множин точок у Matlab визначається за допомогою функції **inpolygon**. Відповідно, частина коду для визначення MDTCP буде виглядати наступним чином:

```
while (MDTCP < 1)
    for i = 1 : numel (H)
        in(:,i) = inpolygon(xHs(i),xYs(i), xHt(j),xYt(j));
    end
    crossed = sum(sum(in));
    if (crossed == 0)
        MDTCP = xYtC;
    end
end
```

де  $H$  – кількість відображень корпусу судна по траєкторії руху;

$xHs(i), xYs(i)$  – координати поточного відображення судна;

$xHt(i), xYt(i)$  – координати поточного відображення судна-цілі;

crossed – 1 у разі перетину; 0, якщо перетину не було;

$xYtC$  – ордината центру поточного відображення судна-цілі.

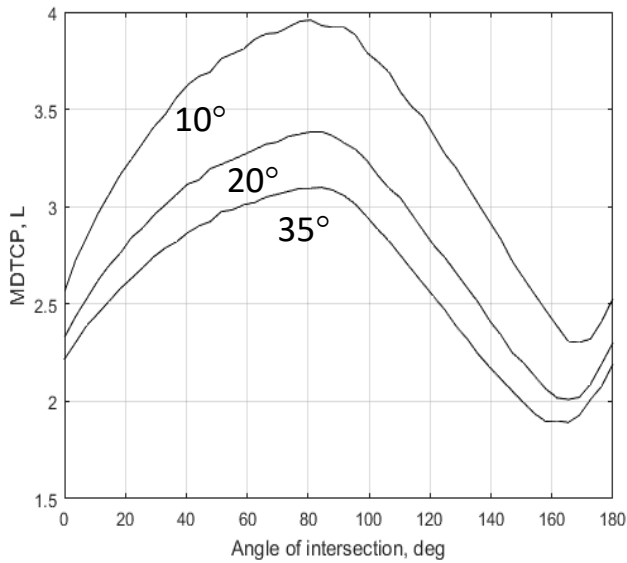


Рис. 6.5. Мінімальна дистанція до точки зіткнення, судно-ціль (довжина 282 м, ширина 32 м) – праворуч

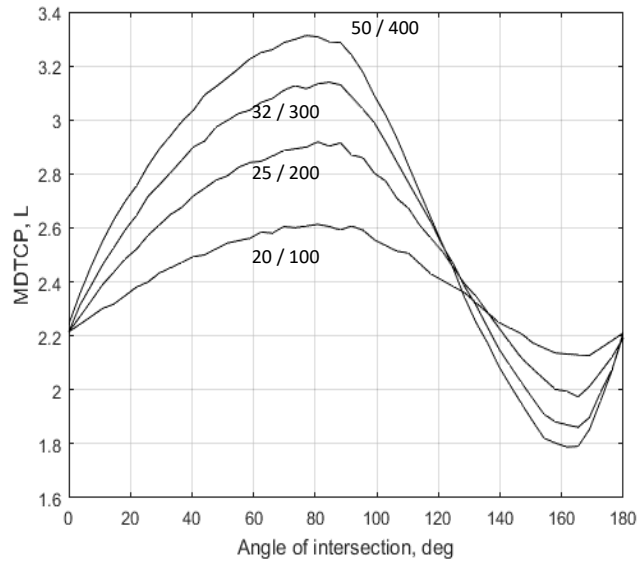


Рис. 6.6. Мінімальна дистанція до точки зіткнення, до суден-цілей праворуч різних розмірів (В / L, м)

На рис. 6.7 - 6.9 представлені розрахунки MDTCP для різних ситуацій. Так на рис. 6.7 чітко простежується залежність мінімальної дистанції від кута перекладки стерна і, відповідно, параметрів циркуляції.

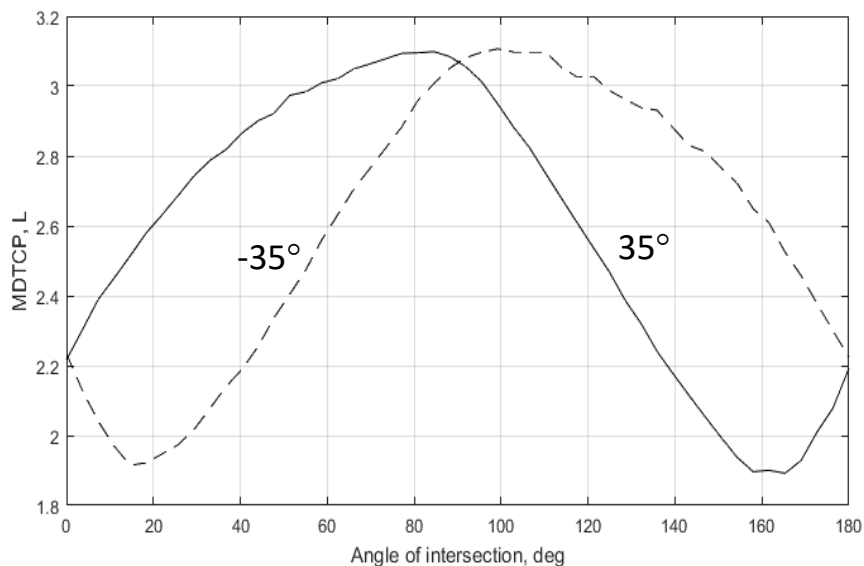


Рис. 6.7. Мінімальна дистанція до точки зіткнення; судно-ціль (довжина 282 м, ширина 32 м) – праворуч, при відвороті вліво і вправо

На рис. 6.8 також видно, що при збільшенні розмірів суден, MDTCP збільшується. Зменшення MDTCP на зустрічних курсах ( $\alpha \in (130, 180)$ ) пов'язано з тим, що алгоритм визначає дистанцію від носа судна до найближчої точки

судна-цілі. Таким чином, коли судно-ціль проходить до нас на зустрічному курсі близькому до паралельного, рухаючись справа наліво, MDTС буде тим менше, чим довше судно-ціль. Зворотна ситуація буде спостерігатися, якщо судно буде рухатися зліва направо.

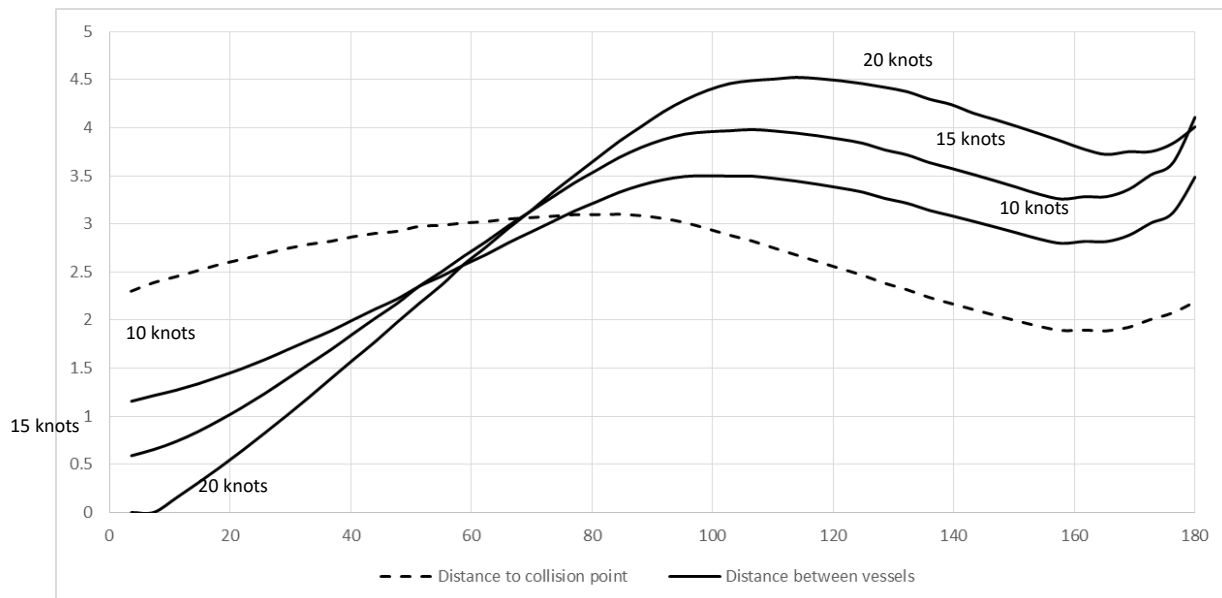


Рис. 6.8. Рис. 3.2. Залежність MDTС від MDTСР при різних швидкостях судна-цілі.  
Швидкість судна – 20 вузлів

Недоліком описаного підходу є те, що при відвороті у бік судна-цілі (рис. 6.8) зіткнення може відбутися не в прогнозованій зоні найкоротшого зближення, а далі по траєкторії руху відвертаючого судна. Більш точно визначити ймовірність зіткнення в цьому випадку дозволить моделювання взаємного руху суден під час маневру. Однак це значно ускладнює алгоритм і веде до збільшення множини можливих рішень.

На рис. 6.9 відображено спосіб введення додаткових обмежень, який базується на тому, що область циркуляції судна не повинна перетинатися з траєкторією руху цілі. Водночас для судна, що знаходиться зліва (у IV чверті), алгоритм збільшує MDTСР за наявності більше ніж однієї точки перетину з траєкторією циркуляції. Для судна, що знаходиться справа (у II чверті), алгоритм збільшує MDTСР за наявності хоча б однієї точки перетину з траєкторією циркуляції.

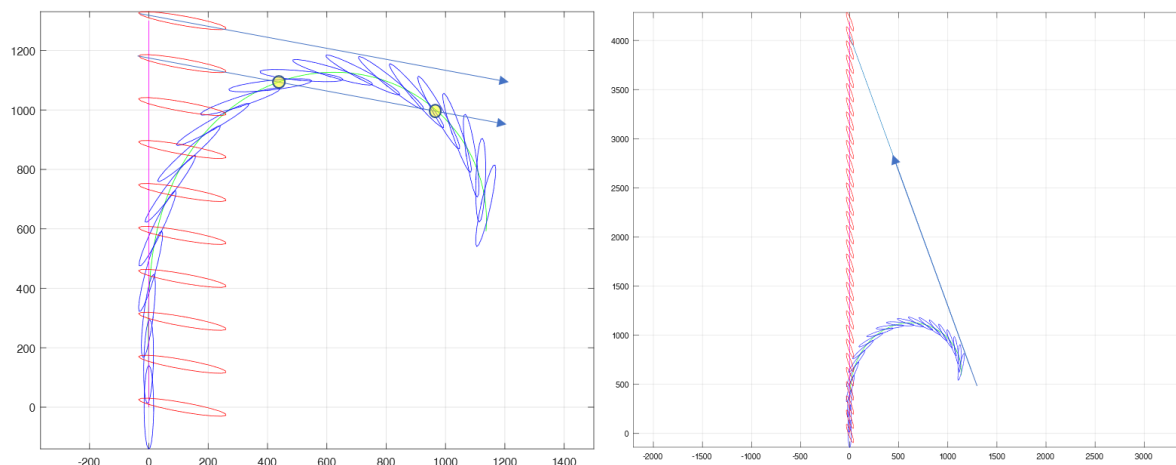


Рис. 6.9. Додаткові обмеження при розрахунку циркуляції зі стерном «право на борт»  
а) судно-ціль попереду зліва; б) судно-ціль на кутах перетину курсу  $\alpha \in (0;90)$

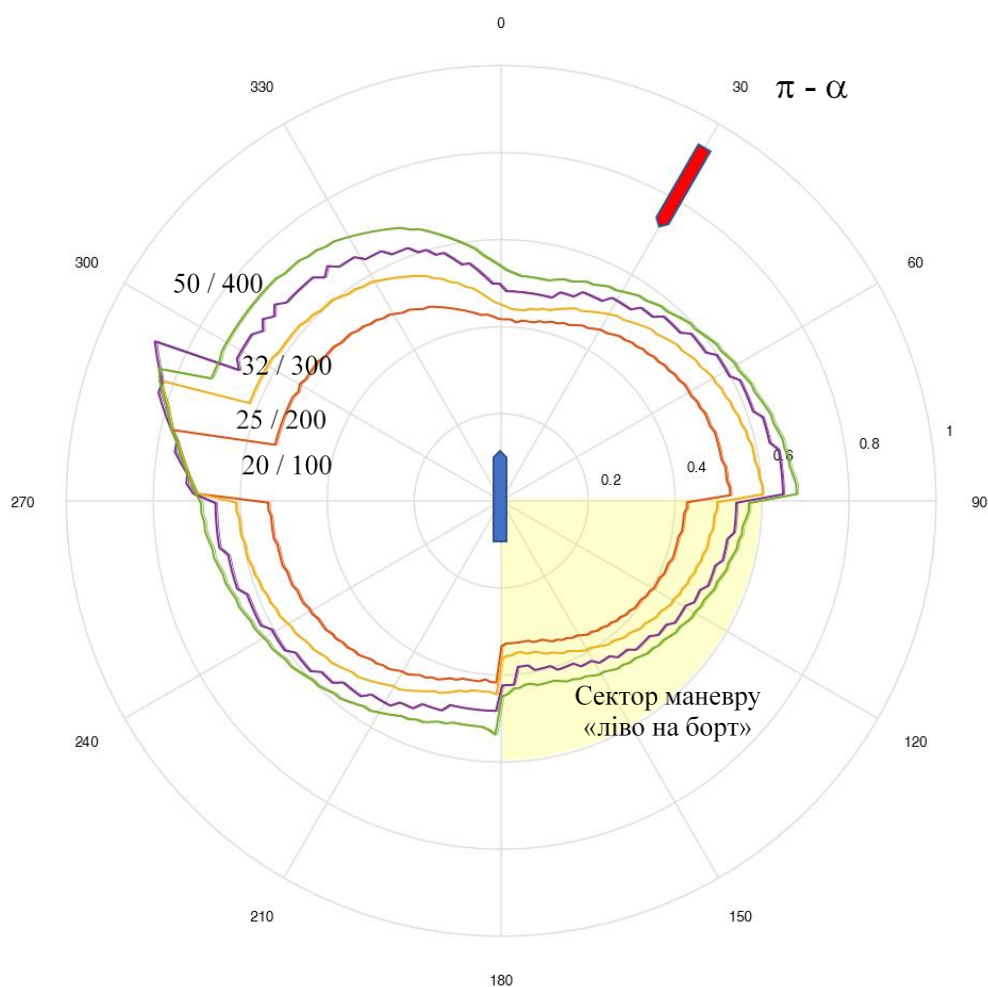


Рис. 6.10. Мінімальна дистанція (у м. милях) до прогнозованої зони найкоротшого зближення з суднами-цільми різних розмірів (B / L, м)

При введенні вищеописаних обмежень у II-й чверті MDTCP набуває значення в 3-4 рази більше, ніж у всіх інших при виконанні аварійного маневру



«право на борт», тому в даному випадку доцільно розрахувати маневр у бік від судна-цілі.

На рис. 6.10 відображені результати розрахунку мінімальної дистанції до прогнозованої зони найкоротшого зближення для суден-цілей різних розмірів. Невиконання аварійного маневру в межах цієї дистанції призведе до зіткнення суден. Водночас крива, що описує MDTCP, має більше стиснення відносно центру на зустрічних та попутних курсових кутах.

## 6.2 Оцінка небезпеки посадки на мілину

### 6.2.1 Оцінка безпечної глибини

Лема. *Небезпека посадки на мілину* існує, якщо судно має ненульову швидкість та прямує до зони де динамічна осадка судна може дорівнювати або бути більшою ніж глибина.

Звідси *безпечна глибина* – це глибина, понад якою, з урахуванням похибок вимірювань, неточності картографічної інформації та динамічних факторів (вертикальна та кильова хитавиця, просідання тощо) судно з заданою імовірністю пройде без контакту з дном.

При цьому запропоновано розділяти проектну та операційну оцінку небезпеки посадки на мілину.

*Проектна оцінка* - визначення ймовірності посадки судна на мілину на заданій ділянці з відомими параметрами, з метою визначення проектних розмірів каналу або суден, що проходять по заданому каналу.

*Операційна оцінка* - визначення параметрів безпеки (зокрема, безпечної глибини) при наявності обмеженого обсягу інформації по заданій ділянці, а також невизначеності в стані погодних умов (вітер, хвилювання, течія).

Найдетальніше проектна оцінка безпечної глибини пропрацьовано у рекомендаціях PIANC [159].

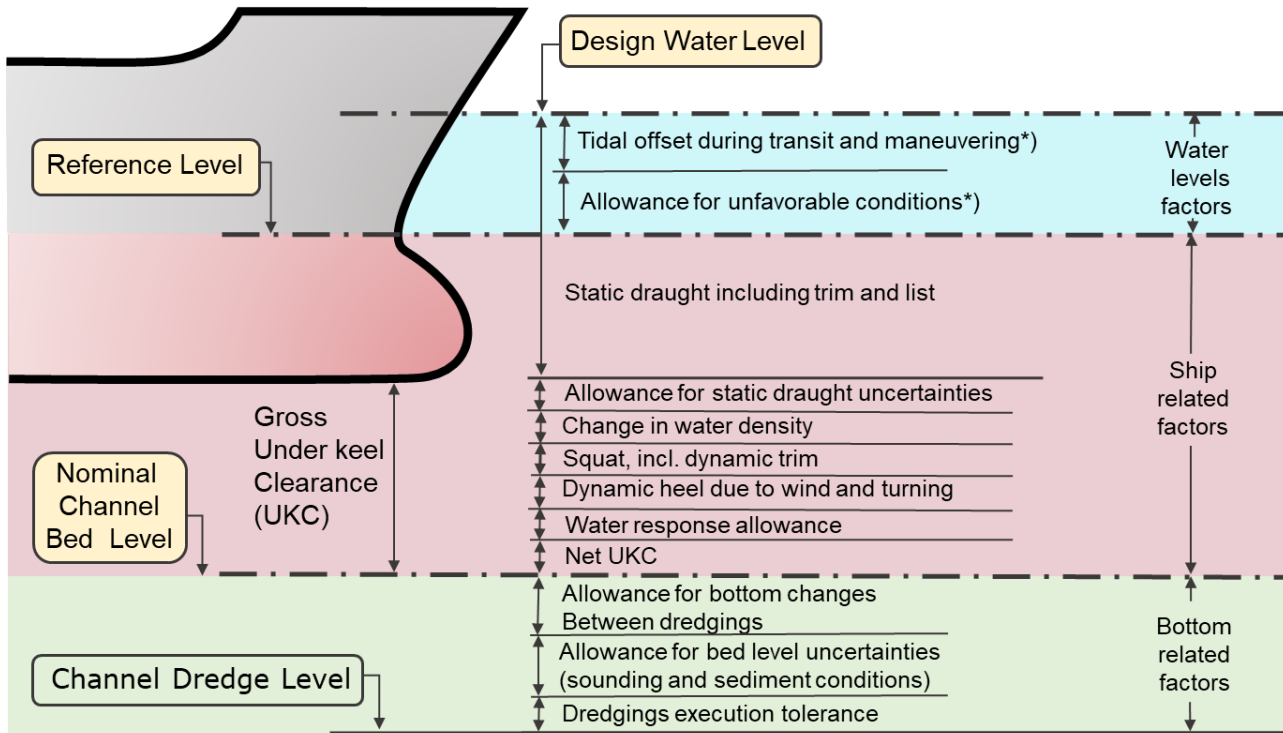


Рис. 6.11. Фактори, які впливають на визначення небезпечної глибини згідно до PIANC

Операційну оцінку безпечної глибини розглянуто у роботах [5, 23, 56, 105, 175]. На основі цих робіт запропоновано розраховувати безпечну глибину наступним чином:

$$D_{safe} = T_{static} + UKC + \Delta_{squat} + \Delta_{ZOC} + \Delta_{\rho} + \Delta_{\varphi} + \Delta_{\theta} - \Delta_{tide} \quad (6.6)$$

де  $D_{Safe}$  – безпечна глибина,  $UKC$  – запас під килем,  $T_{static}$  – осадка судна в стані покою,  $\Delta_{squat}$  – просідання судна на мілководді,  $\Delta_{ZOC}$  – поправка на неточність картографічної інформації,  $\Delta_{\rho}$  – поправка на щільність води,  $\Delta_{\varphi}$  – поправка на кильову та вертикальну хитавицю,  $\Delta_{\theta}$  – поправка на крін,  $\Delta_{tide}$  – рівень приливу.

В загальному вигляді елементи функції (6.6) можуть бути отримані наступним образом:

$$\Delta_{squat} = f(S, C, U_w) \quad (6.7)$$

$$\Delta_{ZOC} = f(ZOC, h) \quad (6.8)$$

$$\Delta_{\rho} = T_{static} \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (6.9)$$

$$\Delta_{\varphi} = f(\mathbb{S}, \varphi_{max}) \quad (6.10)$$

$$\Delta_{\theta} = f(\mathbb{S}, \theta_{max}, w_{max}) \quad (6.11)$$

$$\Delta_{tide} = f(\mathbb{G}, t) \quad (6.12)$$

де  $\mathbb{S}$  – множина параметрів, описуючих корпус судна;  $\mathbb{C}$  – множина параметрів, описуючих конфігурацію каналу чи мілководдя;  $U_w$  – швидкість судна відносно до води;  $\rho_n$  – щільність води;  $\varphi_{max}$  – максимальне розрахункове значення бортового нахилу судна;  $w_{max}$  – максимальне значення вертикальних переміщень судна;  $\theta_{max}$  – максимальне розрахункове значення диференту судна;  $\mathbb{G}$  – множина, описуюча географічну локацію;  $t$  – заданий час.

Просідання судна на мілководді ( $\Delta_{squat}$ ) залежить від форми корпусу, швидкості судна та форми навігаційного каналу. Детальний аналіз низки методів оцінки просідання наведено у роботах [33, 159, 180].

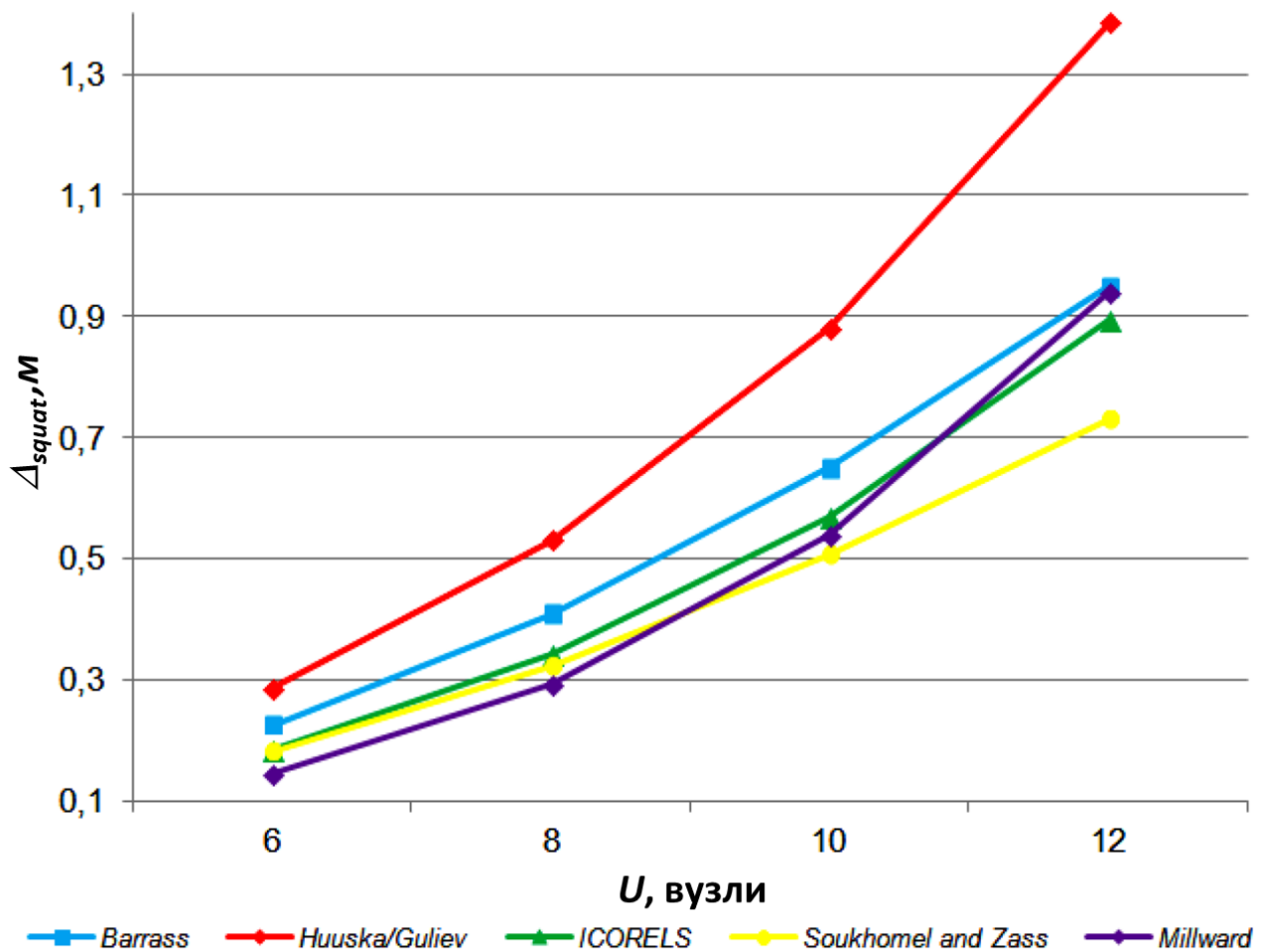


Рис. 6.12. Порівняння методів оцінки просідання судна на мілководді

Відповідно до робіт [33, 159, 180] взагалі методи розрахунку просідання дозволяють отримати збільшення осадки в носовій частині судна, але залежно від форми корпусу судно може просідати більше в носу чи в кормі. Формула Баррасса [21] дозволяє оцінити максимальне просідання у загальному випадку:

$$\Delta_{squat} = \frac{C_B \times S^{0.81} \times U^{2.08}}{20} \quad (6.13)$$

$$S = B \times T_{static} / W \times h$$

де  $C_B$  – коефіцієнт повноти судна;  $B$  – ширина судна;  $W$  – ширина каналу;  $h$  – глибина.

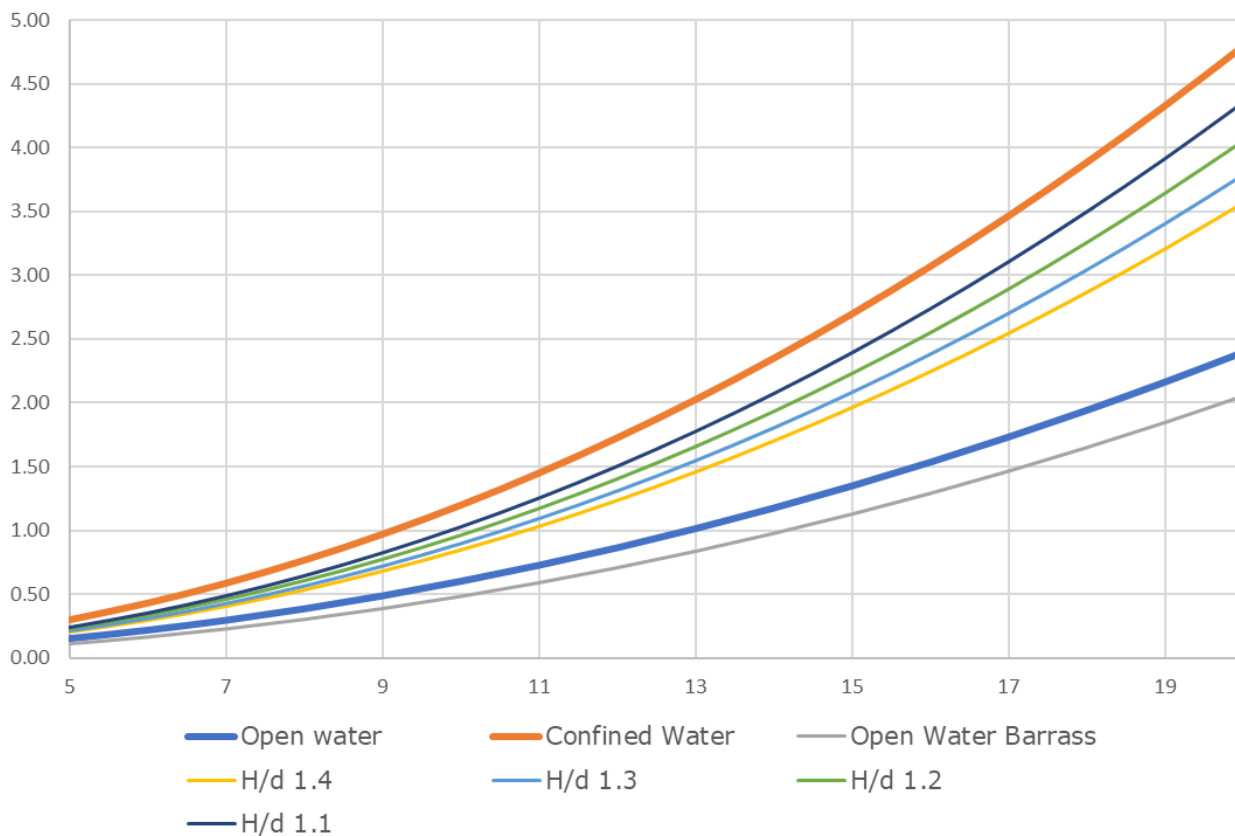


Рис. 6.13. Максимальне просідання за формулами Баррасса. Розміри судна:  $287 \times 48.2 \times 15$  м; Ширина каналу: 200 м. Глибини: 16.5 (H/d 1.1), 18 (H/d 1.2), 19.5 (H/d 1.3), 21 (H/d 1.4)

Просідання отримане за формулою Баррасса декілька більше ніж за іншими методами (рис. 6.12), але згідно до порівнянь з даними експериментів [33, 159] надає невеличкий запас безпеки та дозволяє розрахувати

максимальне просідання, на відміну від більшості методів, які дозволяють розрахувати тільки просідання носом.

У рекомендаціях по плануванню морського переходу суднохідних компаній часто можна зустріти спрощенні формули Баррасса:

$$\Delta_{squat} = \frac{C_B \times V^2}{50}, \text{ при } S \in (0.1; 0.25) \quad (6.14)$$

$$\Delta_{squat} = \frac{C_B \times V^2}{100}, \text{ при } S < 0.1 \quad (6.15)$$

Як видно з рис. 6.13 формули (6.14) та (6.15) дозволяють отримати адекватні значення просідання тільки при  $S = 0.1$ , та  $S = 0.25$  відповідно.

У таблиці 6.2 наведено класифікацію точності глибин відповідно до стандарту ІНО S-67 міжнародної гідрографічної організації [91]. На основі цих даних можна розрахувати поправку  $\Delta_{ZOC}$  (рівняння (6.17)). Згідно до [91] значення надані у таблиці 6.2 розраховано для забезпеченості 95%.

Важливо відмітити, що  $\theta_{max}$  та  $w_{max}$  визначаються в залежності від висоти хвилі, спектру хвилювання (обирається відповідно до району плавання [67, 114]), відповідних амплітудно-частотних характеристик (RAO – response amplitude operators), та забезпеченості (запропонуємо 5%, що дозволить задовольнити 95% стандарту точності ІМО прийнятому у судноводінні) отже:

$$\Delta_{\theta} = 0.5L \sin(\theta_{5\%}) + w_{5\%} \quad (6.16)$$

На рис. 6.14 та 6.15 відображено діаграми амплітудно-частотних характеристик вертикальних та кільових коливань контейнеровозу на морському хвилюванні.

Таблиця 6.2. Класифікація точності картографічної інформації  
згідно до ІНО S-67

| ZOC | Точність позиції                                      | Точність глибини |              | Покриття дна                                                                                                                                  |
|-----|-------------------------------------------------------|------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1  | ± 5 м + 5% глибини                                    | Глибина (м)      | Точність (м) | Проведено дослідження всієї області. Виявлені значні особливості морського дна та виміряні глибини.                                           |
|     |                                                       | = 0.50 + 1%h     |              |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 5                | 0.55         |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 10               | 0.6          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 15               | 0.65         |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 20               | 0.7          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 25               | 0.75         |                                                                                                                                               |
| A2  | ± 20 м                                                | = 1.00 + 2%h     |              | Проведено дослідження всієї області. Виявлені значні особливості морського дна та виміряні глибини.                                           |
|     |                                                       | 5                | 1.1          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 10               | 1.2          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 15               | 1.3          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 20               | 1.4          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 25               | 1.5          |                                                                                                                                               |
| B   | ± 50 м                                                | = 1.00 + 2%h     |              | Повне дослідження області не досягнуто; невизначені характеристики, небезпечні для поверхневої навігації, не очікуються, але можуть існувати. |
|     |                                                       | 5                | 1.1          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 10               | 1.2          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 15               | 1.3          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 20               | 1.4          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 25               | 1.5          |                                                                                                                                               |
| C   | ± 500 м                                               | = 2.0 + 5%h      |              | Повне дослідження області не досягнуто; можуть зустрітися аномальні глибини.                                                                  |
|     |                                                       | 5                | 2.3          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 10               | 2.5          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 15               | 2.8          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 20               | 3.0          |                                                                                                                                               |
|     |                                                       | 25               | 3.3          |                                                                                                                                               |
| D   | Нижче ZOC C                                           |                  |              | Повне дослідження області не досягнуто; можуть зустрітися великі аномалії глибини.                                                            |
| U   | Не оцінено - якість батиметричних даних ще не оцінена |                  |              |                                                                                                                                               |

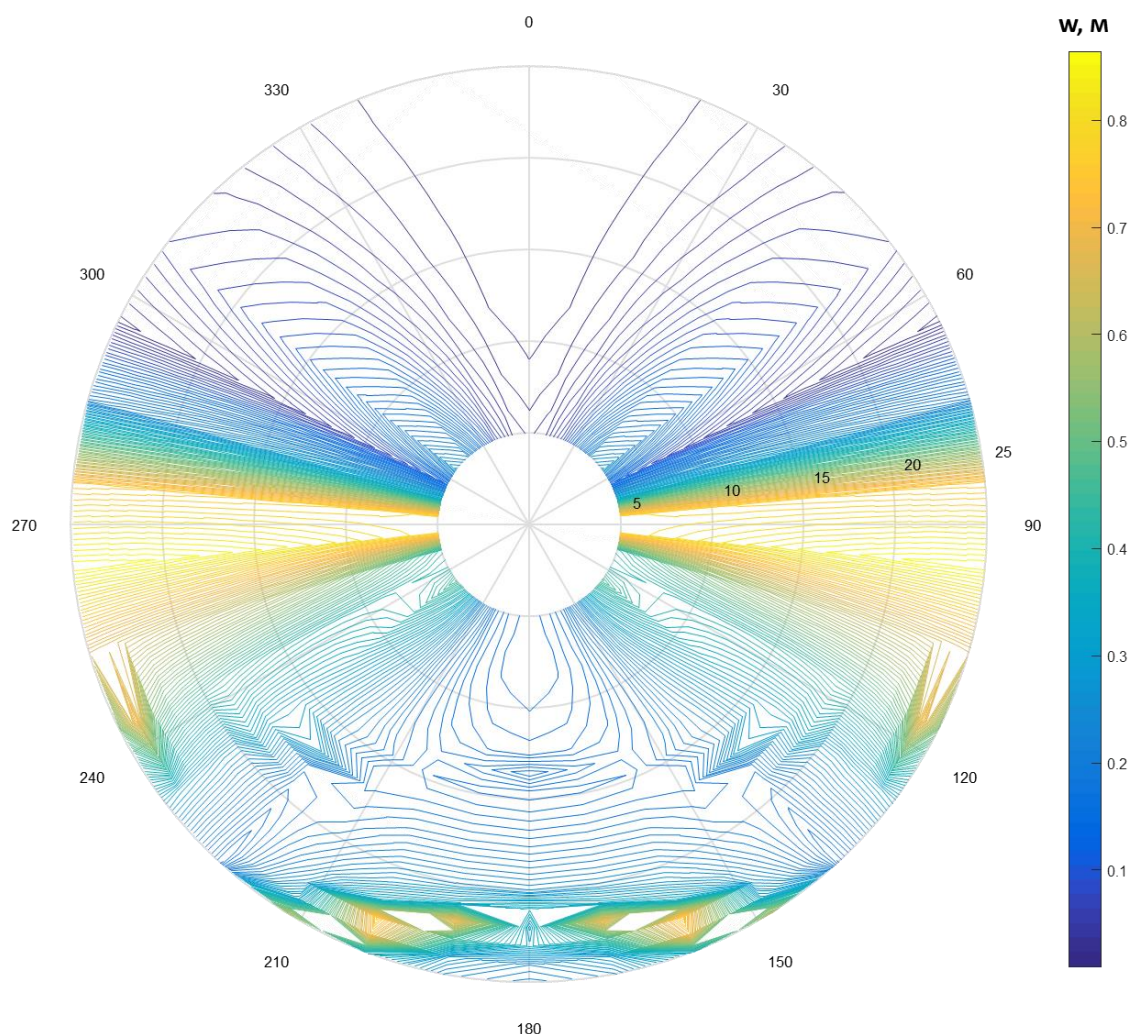


Рис. 6.14. АЧХ вертикальних переміщень контейнеровозу на хвилюванні у діапазоні швидкостей 5-25 вузлів. Розміри судна:  $193 \times 30.8 \times 10$  м;

Розрахунковий кут бортового нахилу  $\varphi_{max}$  складається з трьох компонентів:

$$\varphi_{max} = \varphi_{turn} + \varphi_{wind} + \varphi_{5\%}, \quad (6.17)$$

де  $\varphi_{turn}$  – крін, який виникає під час повороту судна та може визначатися за допомогою системи рівнянь (4.13);  $\varphi_{wind}$  - крін, який виникає під впливом вітру, та може бути визначений додаванням сил та моментів розрахованих згідно до роботи [27] до системи рівнянь (4.13);  $\varphi_{RAO}$  – амплітуда бортових коливань, яка визначається залежно від спектральних характеристик хвилювання у районі, який розглядається та розраховується на основі математичної моделі (3.23).



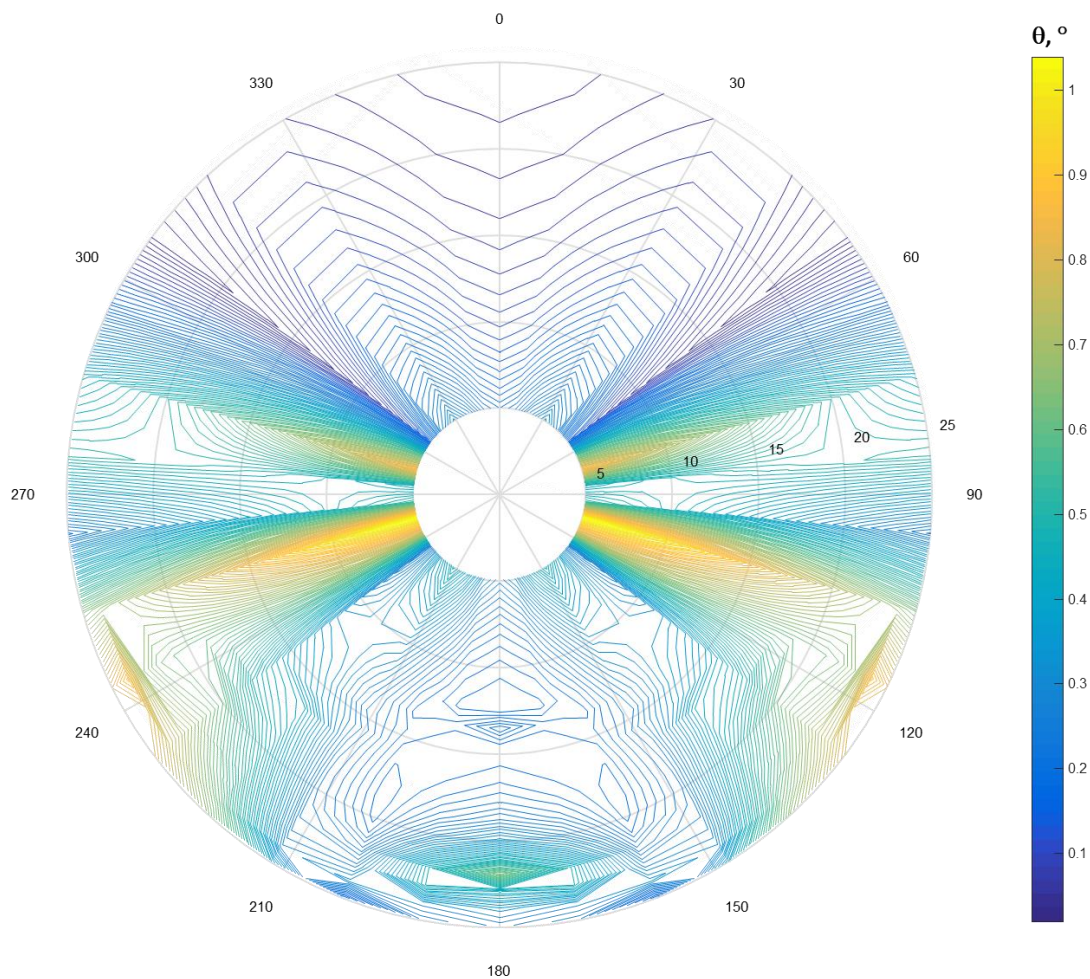


Рис. 6.15. АЧХ кильових нахилів контейнеровозу на хвилюванні у діапазоні швидкостей 5-25 вузлів. Розміри судна:  $193 \times 30.8 \times 10$  м;

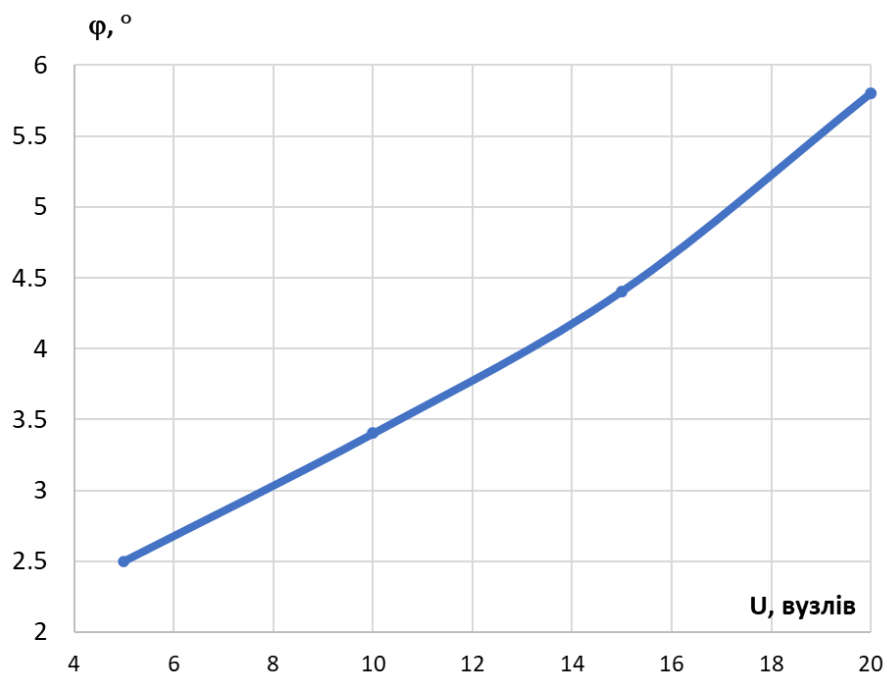


Рис. 6.16. Залежність максимального кріну контейнеровозу під час повороту від початкової швидкості. Розміри судна:  $282 \times 32.2 \times 10$  м;  $GM = 2.0$  м;  $VCG = 15$  м



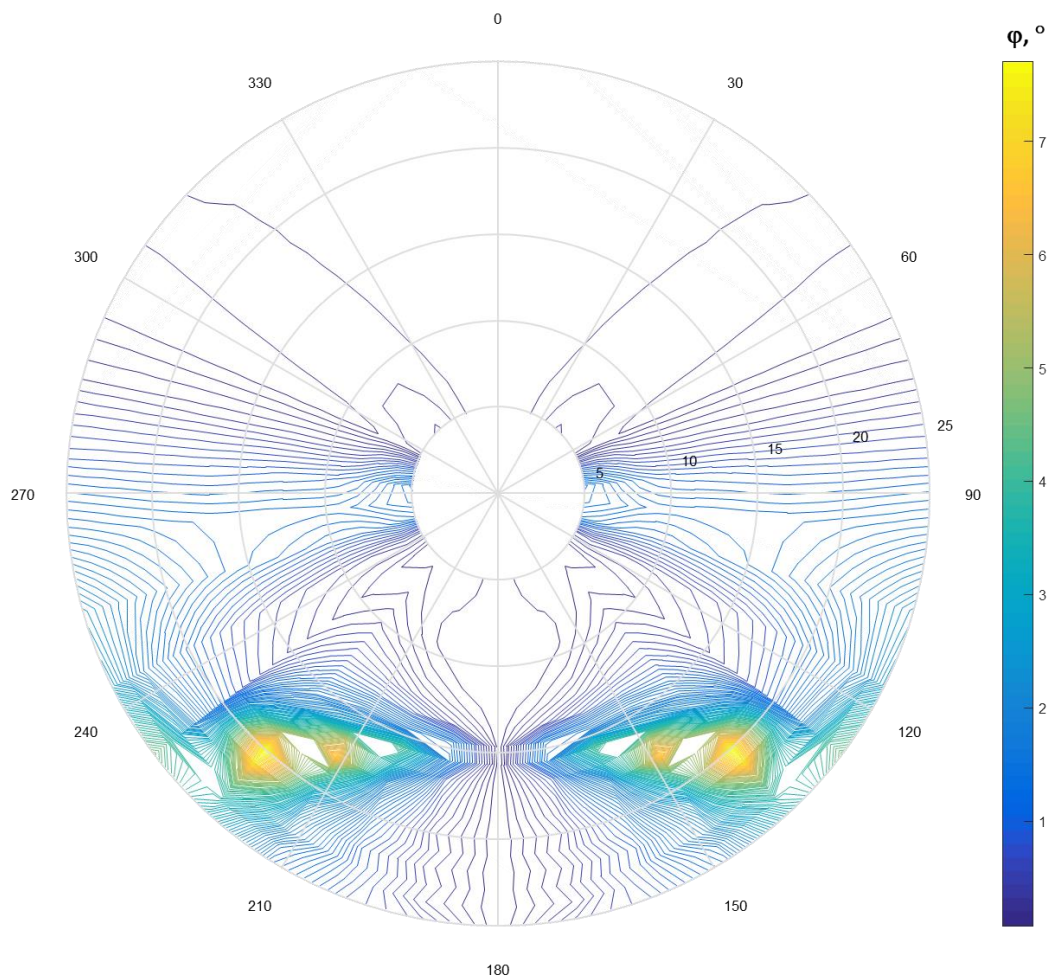


Рис. 6.17. АЧХ бортових нахилів контейнеровозу на хвилюванні у діапазоні швидкостей 5-25 вузлів. Розміри судна:  $193 \times 30.8 \times 10$  м;

На рис. 6.16 та 6.17 відображено залежність максимального кріну контейнеровозу на повороті від швидкості судна та діаграму амплітудно-частотних характеристик бортових коливань контейнеровозу на морському хвилюванні відповідно.

$$\Delta\varphi = 0.5B \tan(\varphi_{max}) \quad (6.18)$$

Для компенсації невизначеностей запропоновано використання політики запасу під кілем (UKC policy), що добре погоджується з прийнятою в індустрії практикою. На основі аналізу існуючих політик судноплавних компаній, індустріальних рекомендацій [105] та експертного аналізу було запропоновано UKC політику наведену у таблиці 6.3, що відрізняється від існуючих урахуванням точності картографічної інформації.

Таблиця 6.3. Визначення запасу глибини під кілем (УКС) з урахуванням точності карти (CATZOC)

| Район    | Відкритий<br>D         | Відкритий<br>A         | Прибрежний<br>D        | Прибрежний<br>A        | Канал           | Причал          |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| Відстань | >12 миль               |                        | <12 миль               |                        | Min             | Min             |
| ZOC      | D, U                   | A1-C                   | D, U                   | A1-C                   | 0.5 m           | 0.3 m           |
| УКС      | $0.5 \cdot T_{static}$ | $0.2 \cdot T_{static}$ | $0.2 \cdot T_{static}$ | $0.1 \cdot T_{static}$ | $0.015 \cdot B$ | $0.015 \cdot B$ |

де **ZOC** – Zone of Confidence, характеристика точності картографічної інформації, яка може приймати шість значень: A1, A2, B, C, D, U. A (ZOC A1, A2, B)– accurate, район у якому поправку на точність картографічної інформації визначено. D (ZOC C, D) – doubtful, район у якому поправку на точність картографічної інформації не визначено.

#### 6.2.2 Розрахунок границь безпечного коридору

Сучасні ЕКНІС (електронні картографічні навігаційні та інформаційні системи) дозволяють в електронному вигляді задавати маршрут судна як множину чи, використовуючи термінологію прийняту в програмуванні, – об'єкт, з низкою суб-об'єктів.

$$\mathbb{R} = \langle WP(x, y), Rad, XTD(P, S), I \rangle \quad (6.19)$$

де  $WP$  – множина маршрутних точок;  $Rad$  – множина радіусів повороту,  $XTD$  – множина відстаней від лінії завданого маршруту з лівого та правого бортів,  $I$  – множина інших параметрів маршруту.

З рисунку 6.18 видно, що під час планування навігатор чи автоматична система повинні перевірити, що небезпечною для судноводіння є не множина ліній які поєднують маршрутні точки  $WP$ , а запланована полоса руху судна.

Мінімальну півширину безпечної полоси можна виразити у вигляді:

$$XTD = \frac{B}{2} + d_{ZOC} + d_{pos} + d_{\alpha} \quad (6.20)$$

де  $d_{zoc}$  – 95% похибка позиції небезпеки на карті (з таблиця 6.2);  $d_{pos}$  – 95% похибка позиції судна;  $d_\alpha$  – запас з урахуванням дрейфу судна.

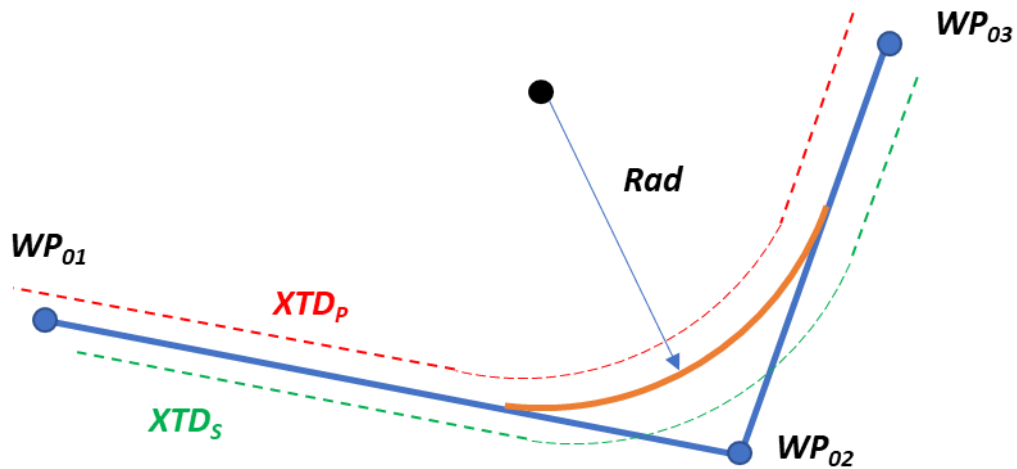


Рис. 6.18. Графічне відображення елементів маршруту

Базуючись на результатах експериментів отриманих у дослідженнях Ванторре [131], коли траєкторію судна прокладено несиметрично до осі каналу, а ближче до його кромки на відстані двох ширин судна та при підвищенні швидкості значно підвищується ефект підтягування корми на кромку каналу (рис. 6.19).

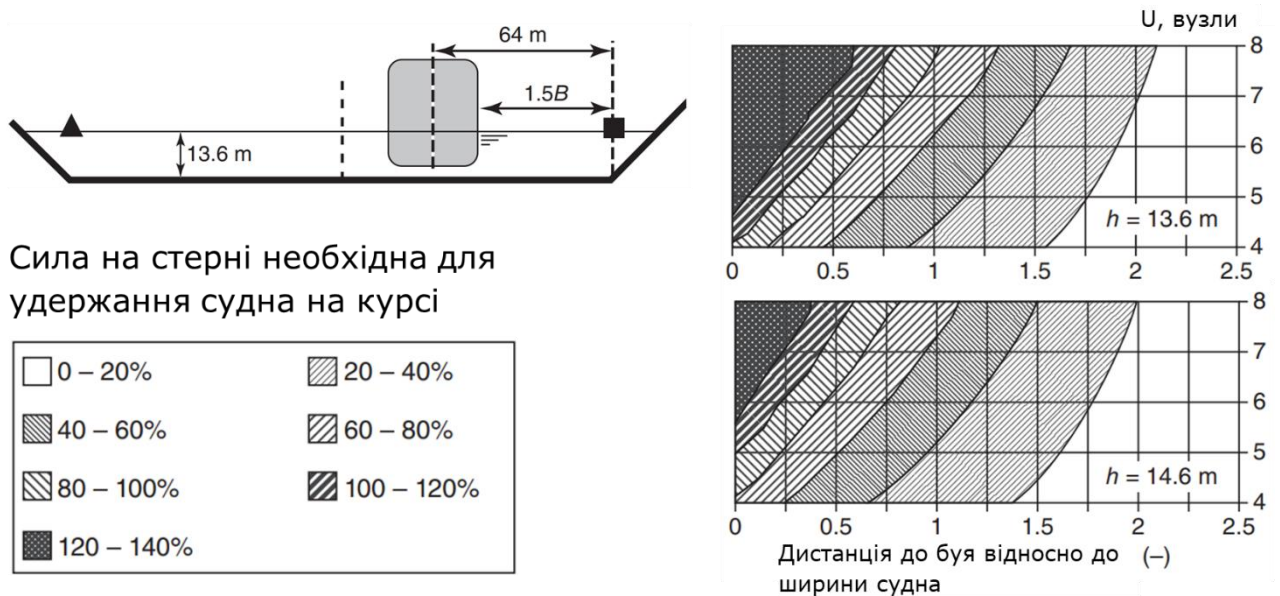


Рис. 6.19. Експериментальні дані залежності сили на стерні від швидкості судна та близькості до стінки каналу. Контейнеровоз. Розміри судна:  $294 \times 32.2 \times 10,5$  м

З рис. 6.19 видно, що при відносній дистанції яка дорівнює  $0.5 \div 0.75B$  (залежно від відношення глибини до осадки) судно становиться практично

некерованием. При дистанції  $> 2B$  ефект підтягування майже не проявляється. Тобто:

$$XTD = \min \left\{ f(B, U, h/T), \left( \frac{B}{2} + d_{zoc} + d_{pos} + d_{\alpha} \right) \right\} \quad (6.21)$$

Чи у випадку конкретного судна коли залежність наведена у (6.21) встановлено:

$$XTD = \min \left\{ 2B, \left( \frac{B}{2} + d_{zoc} + d_{pos} + d_{\alpha} \right) \right\} \quad (6.22)$$

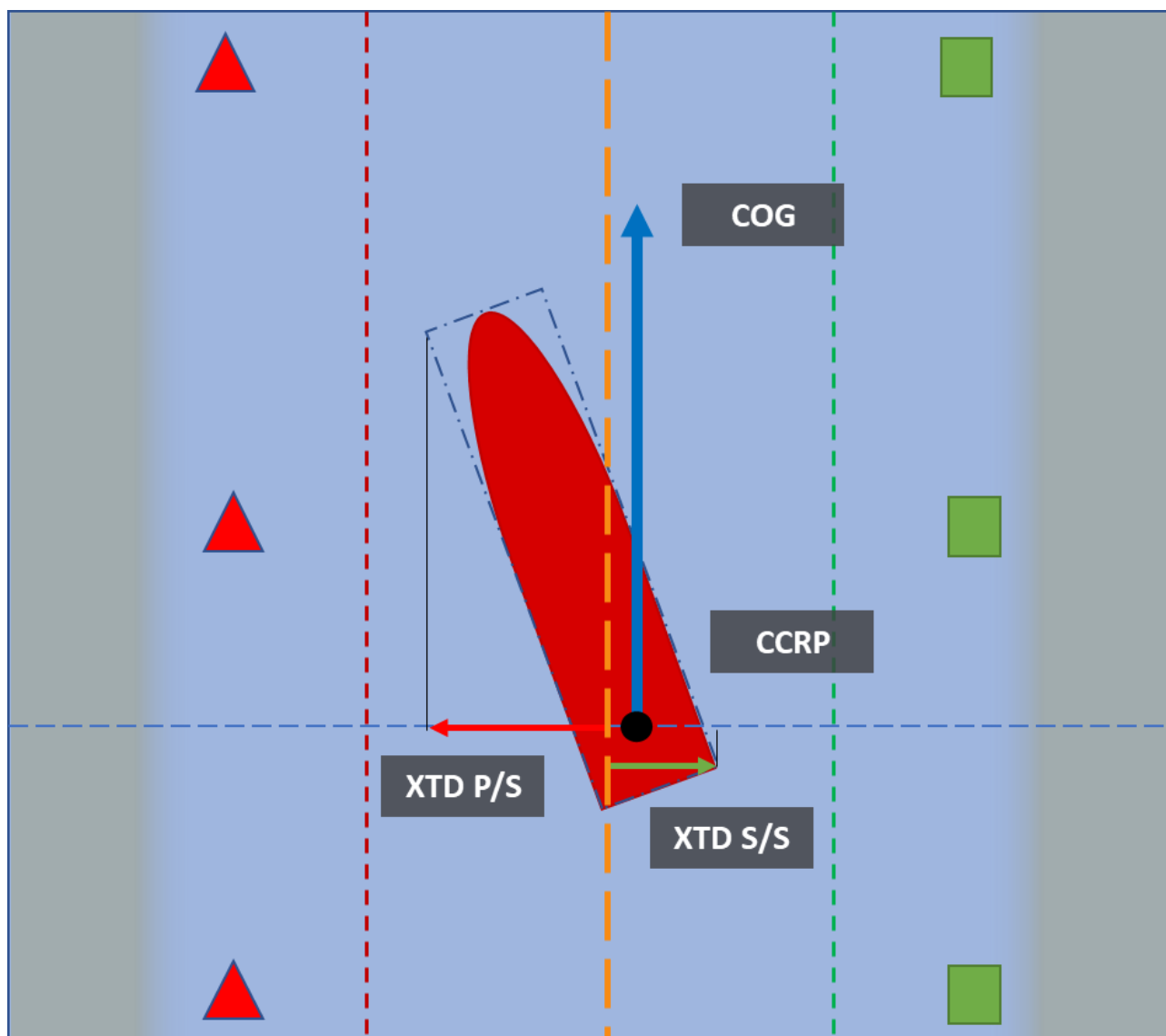


Рис. 6.20. Урахування XTD для судна, яке має кут дрейфу.

$XTD$  зазвичай розраховується як відстань між  $CCRP$  та лінією маршруту (рис. (4.15) та (4.16)), але при появленні куту дрейфу у стислих умовах важливо також враховувати відповідні дистанції від носа та корми судна (рис. 6.20). Таким чином,  $XTD$  носа та корми з урахуванням дрейфу:

$$\left. \begin{aligned} XTD_F &= XTD + (L - CCRP) \cdot \sin(\alpha) + \frac{B}{2} \cdot \text{sign}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \\ XTD_A &= XTD - \left( CCRP \cdot \sin(\alpha) + \frac{B}{2} \cdot \text{sign}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \right) \end{aligned} \right\} \quad (6.23)$$

де  $CCRP$  – відстань від корми судна до заданої точки відліку.

Таблиця 6.1. Залежність  $XTD$  носа та корми від куту дрейфу ( $L = 300$  м;  $B = 40$  м;  $CCRP = 50$  м)

| $\alpha, ^\circ$  | 0 | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |
|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $XTD_F, \text{м}$ | 0 | 42  | 63  | 84  | 104 | 124 | 142 | 160 | 176 |
| $XTD_A, \text{м}$ | 0 | -24 | -28 | -32 | -36 | -39 | -42 | -45 | -47 |

Таблиця 6.2. Залежність куту дрейфу від швидкості течії спрямованої у борт судна

| Течія,<br>вузли | Швидкість судна, вузли |    |    |    |    |    |
|-----------------|------------------------|----|----|----|----|----|
|                 | 1                      | 2  | 4  | 6  | 8  | 10 |
| 1               | 45                     | 27 | 14 | 9  | 7  | 6  |
| 2               | 63                     | 45 | 27 | 18 | 14 | 11 |
| 3               | 72                     | 56 | 37 | 27 | 21 | 17 |
| 4               | 76                     | 63 | 45 | 34 | 27 | 22 |

| PASSAGE PLAN - UKC CALCULATION |                                                      |                |       |                |         |                |   |                |   |                |   |                |  |                |  |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------|-------|----------------|---------|----------------|---|----------------|---|----------------|---|----------------|--|----------------|--|
| Vessel                         | Dream                                                | From           | Miami | To             | Norfolk | WP +           |   | WP -           |   |                |   |                |  |                |  |
| ROUTE DATA                     |                                                      |                |       |                |         |                |   |                |   |                |   |                |  |                |  |
|                                |                                                      |                |       |                |         | 1              | 2 | 3              | 4 | 5              | 6 | 7              |  |                |  |
| No.                            | ETA (Date & Time)                                    | 08 May - 12:05 |       | 08 May - 12:07 |         | 08 May - 12:11 |   | 08 May - 12:16 |   | 08 May - 12:19 |   | 08 May - 12:31 |  | 09 May - 20:55 |  |
|                                | Waypoint / Position / Leg                            | WP 00          |       | WP 01          |         | WP 02          |   | WP 03          |   | WP 04          |   | WP 05          |  | WP 10          |  |
| 1                              | UKC area                                             | Pilotage       |       | Pilotage       |         | Pilotage       |   | Pilotage       |   | Pilotage       |   | Pilotage       |  | Deep Sea D     |  |
| 2                              | Maximum Planned Speed                                | 0.0 Knots      |       | 5.0 Knots      |         | 5.0 Knots      |   | 5.0 Knots      |   | 10.0 Knots     |   | 10.0 Knots     |  | 20.0 Knots     |  |
| 3                              | Shallowest charted depth within XTE corridor         | 15.1 m         |       | 15.1 m         |         | 15.1 m         |   | 15.2 m         |   | 14.6 m         |   | 14.6 m         |  | 411.0 m        |  |
| 4                              | Ship's maximum static draught                        | 10.50 m        |       | 10.50 m        |         | 10.50 m        |   | 10.50 m        |   | 10.50 m        |   | 10.50 m        |  | 10.50 m        |  |
| 5                              | CATZOC Category                                      | B              |       | B              |         | B              |   | B              |   | B              |   | C              |  | A1             |  |
| 6                              | Confined Waters Width at the narrowest point         | 182.0 m        |       | 182.0 m        |         | 158.0 m        |   | 158.0 m        |   | 162.0 m        |   | 0.0 m          |  | 0.0 m          |  |
| 7                              | Predicted Height of Tide ( <i>window</i> )           | 0.70 m         |       | 0.70 m         |         | 0.70 m         |   | 0.70 m         |   | 0.70 m         |   | 0.00 m         |  | 0.00 m         |  |
| 8                              | Vessel's Expected Heel                               | 2.0 degree     |       | 2.0 degree     |         | 2.0 degree     |   | 2.0 degree     |   | 2.0 degree     |   | 5.0 degree     |  | 5.0 degree     |  |
| 9                              | Density of Passage Sea Water                         | 1.025 t/m3     |       | 1.025 t/m3     |         | 1.025 t/m3     |   | 1.025 t/m3     |   | 1.025 t/m3     |   | 1.025 t/m3     |  | 1.025 t/m3     |  |
| 10                             | Significant wave height                              | 0.00 m         |       | 0.00 m         |         | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 2.50 m         |  | 2.50 m         |  |
| CORRECTIONS                    |                                                      |                |       |                |         |                |   |                |   |                |   |                |  |                |  |
| 11                             | Area (Open / Confined Waters)                        | Confined Water |       | Confined Water |         | Confined Water |   | Confined Water |   | Confined Water |   | Shallow Water  |  | Deep Water     |  |
| 12                             | Allowance for accuracy of hydrographic data (CATZOC) | 1.30 m         |       | 1.30 m         |         | 1.30 m         |   | 1.30 m         |   | 1.29 m         |   | 2.73 m         |  | 4.61 m         |  |
| 13                             | Draught increase due to heel                         | 0.84 m         |       | 0.84 m         |         | 0.84 m         |   | 0.84 m         |   | 0.84 m         |   | 2.11 m         |  | 2.11 m         |  |
| 14                             | Sinkage due to change of density of Sea Water        | 0.00 m         |       | 0.00 m         |         | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 0.00 m         |  | 0.00 m         |  |
| 15                             | Squat at Maximum Planned Speed ( <b>Simple</b> )     | 0.00 m         |       | 0.35 m         |         | 0.35 m         |   | 0.35 m         |   | 1.40 m         |   | 0.70 m         |  | 0.00 m         |  |
| 16                             | Squat at Maximum Planned Speed ( <b>Full</b> )       | 0.00 m         |       | 0.25 m         |         | 0.29 m         |   | 0.28 m         |   | 1.22 m         |   | 0.61 m         |  | 0.00 m         |  |
| 17                             | Draught increase due to pitch / heave                | 0.00 m         |       | 0.00 m         |         | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 0.00 m         |   | 1.25 m         |  | 1.25 m         |  |
| 18                             | Required remaning clearance (RUKC)                   | 1.05 m         |       | 1.05 m         |         | 1.05 m         |   | 1.05 m         |   | 1.05 m         |   | 1.05 m         |  | 5.25 m         |  |
| 19                             | Dynamic Under Keel Clearance                         | 3.16 m         |       | 2.81 m         |         | 2.81 m         |   | 2.91 m         |   | 1.27 m         |   | -2.69 m        |  | 392.53 m       |  |
| 20                             | Acceptable?                                          | YES            |       | YES            |         | YES            |   | YES            |   | YES            |   | NO             |  | YES            |  |
| ECDIS SETTINGS                 |                                                      |                |       |                |         |                |   |                |   |                |   |                |  |                |  |
| 21                             | ECDIS 'Safety Depth' & 'Safety Contour'              | 13.0 m         |       | 13.4 m         |         | 13.4 m         |   | 13.4 m         |   | 14.4 m         |   | 18.4 m         |  | 23.8 m         |  |
| 22                             | Deep Contour (2 x Draught)                           | 21.00 m        |       | 21.00 m        |         | 21.00 m        |   | 21.00 m        |   | 21.00 m        |   | 21.00 m        |  | 21.00 m        |  |
| 23                             | ECDIS 'Shallow Contour'                              |                |       |                |         |                |   |                |   |                |   |                |  |                |  |

Рис. 6.21. Знімок екрану з програми «UKC calculation tool»

У таблиці 6.2 наведено залежність куту дрейфу від швидкості течії спрямованої у борт судна. Видно, що дрейф вище 20° може виникнути чи при дуже великому значенні течії, чи при дуже маленькій швидкості судна. До того ж течія у каналі чи річці взагалі направлена уздовж суднохідного шляху, тому імовірність ситуації коли судне в транзиті в вузькості буде мати сильну бортову

течію також мала. Звідси, практично-обумовлене обмеження для розрахунків ХТД:  $\alpha_{max} = 20^\circ$ .

На базі проведених досліджень було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє призвести розрахунок та оцінку безпечної глибини на заданих відрізках маршруту судна (рис. 6.21).

### *Висновки за розділом 6*

У розділі проаналізовані особливості маневрування судна у ситуації небезпечного зближення у перспективі «Міжнародних правил запобігання зіткненню суден» (МППЗС) і маневрених характеристик сучасних суден. Запропоновано розділити зону навколо судна на чотири чверті з різними критеріями оцінки мінімальної дистанції до точки зіткнення і різними маневрами останнього моменту в залежності від кута перетину курсів, сектора дії правил МППЗС і характеристик обраного маневру.

Розроблено алгоритм визначення мінімальної дистанції до прогнозованої точки зіткнення суден, на якій можна виконати маневр циркуляції з перекладкою стерна на борт. Ця дистанція залежить від виду виконуваного судном маневру, кута перетину курсів і розмірів суден.

Отриманий алгоритм дозволяє аналітично визначити межі зони небезпечного зближення і, зважаючи на це, дати оцінку безпеки ситуації. Це є особливо важливим при здійсненні судном дій згідно з Правилом 17 МППЗС у випадку, коли судно-ціль не здійснює маневр, щоб уникнути зіткнення.

Визначено умови безпечного плавання у відношенні до навігаційних небезпек, зокрема безпечної глибини та поперечного відхилення від завданого маршруту. Запропоновано класифікацію зон запасу глибини під кілем судно у залежності від точності картографічної інформації. Розкрито елементи, які входять в розрахунок безпечної глибини.

## РОЗДІЛ 7. ОЦІНКА НАВІГАЦІЙНИХ РИЗИКІВ

### 7.1 Ризик-орієнтований підхід до оцінки небезпеки контакту

На основі аналізу аварійності та моніторингу дій судноводіїв під час виконання навігаційних завдань на симуляторах розглянутих у 1-му розділі роботи було зроблено висновок, що найбільш імовірними під час судноводіння є навігаційні інциденти (зіткнення та посадки на мілину), в більшій мірі викликані невірними діями судноводіїв, а саме

- невірною оцінкою ситуації;
- невірним маневром; чи
- невірним плануванням.

Згідно до рекомендацій ІМО по плануванню рейсу [101] навігаційну задачу можна розділити на чотири етапи:

- оцінка ( $E_1$ );
- планування ( $E_2$ );
- виконання ( $E_3$ );
- моніторинг ( $E_4$ ).

Ризик – це комбінація імовірності проявлення небезпеки та потенційних наслідків від її проявлення. Функціонально ризик прийнято виражати, як добуток імовірності  $P$  та тяжкості  $S$ :

$$R = P \times S \quad (7.1)$$

При цьому в рамках даної задачі доцільно розділити оцінку ризику на два типи:

*Проектна оцінка ризику* - визначення ймовірності посадки судна на мілину чи зіткнення на основі ретроспективних даних чи експертного аналізу.

*Операційна оцінка ризику* – оцінка імовірності та ступеня наслідків по кількісним показникам у відсутності достатньої вибірки статистичних даних.



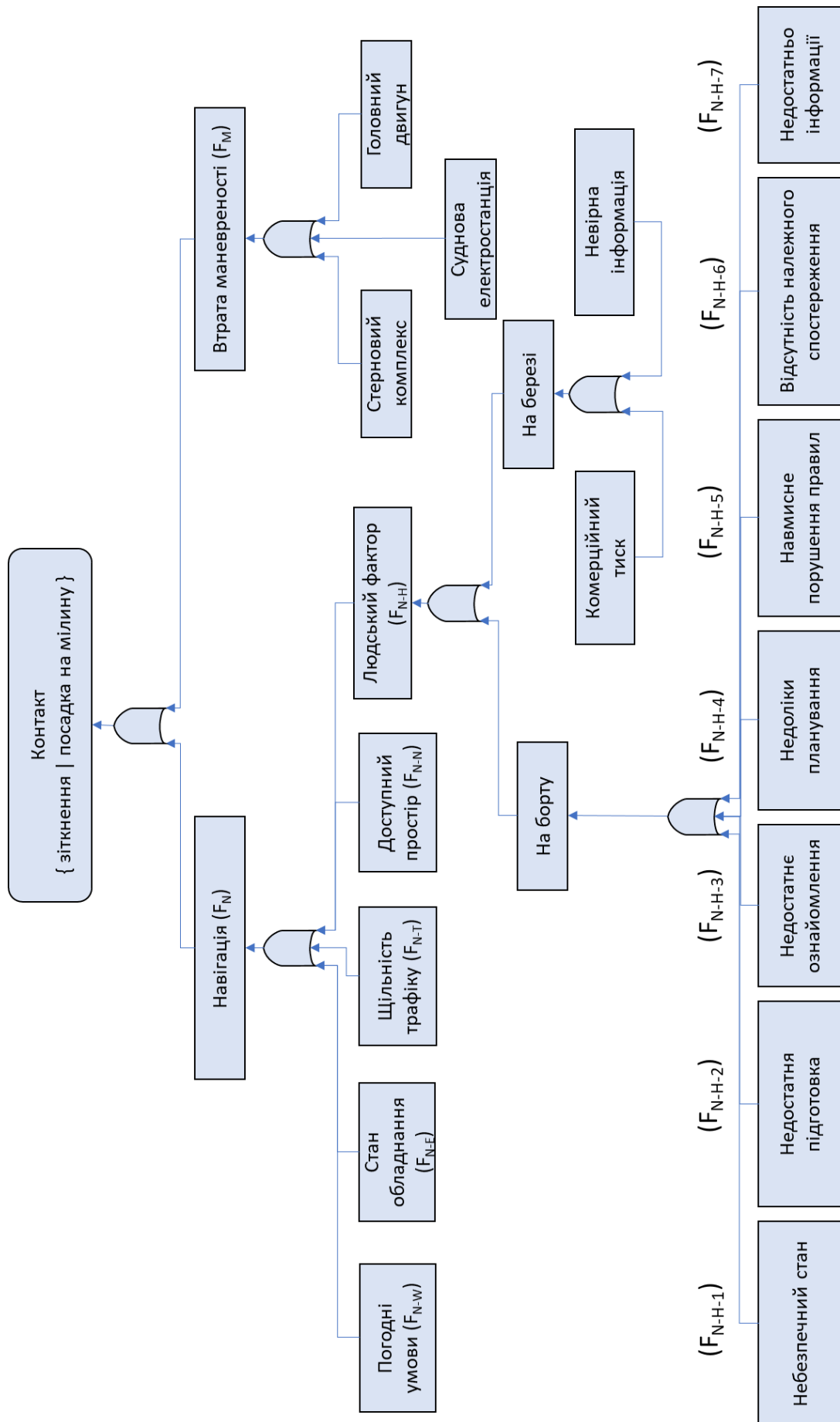


Рис. 7.1. Модель ризику зіткнення / посадки на міліну

Базуючись на роботах [14, 100, 126, 205, 218] запропонуємо ризик-модель зіткнення та посадки на мілину (рис. 7.1).

Група факторів «Небезпечний стан» (рис. 7.1,  $F_{N-H-1}$ ) включає наступні стани:

- поспіх;
- збентеження;
- виснаження;
- самовдоволення;
- неясність;
- відволікання;
- неадекватний зв'язок;
- відхилення від плану;
- порушення правил.

Існуючи технологічні і наукові розробки у комбінації з низкою методів описаних у розділах 3-6 у цілому дозволяють зменшити імовірність проявлення небезпек як на етапах  $E_1$  та  $E_2$ , так і на етапах  $E_3$  та  $E_4$ .

*Таблиця 7.1. Результати експертного опитування судноводіїв*

| Фактор      |                                     | Середня оцінка | СКП |
|-------------|-------------------------------------|----------------|-----|
| $F_{N-H-1}$ | Небезпечний стан                    | 6.8            | 29% |
| $F_{N-H-2}$ | Недостатня підготовка               | 8.2            | 17% |
| $F_{N-H-3}$ | Недостатнє ознайомлення з об'єктом  | 6.8            | 28% |
| $F_{N-H-4}$ | Недоліки планування                 | 6.8            | 29% |
| $F_{N-H-5}$ | Навмисне порушення правил           | 8.2            | 23% |
| $F_{N-H-6}$ | Відсутність належного спостереження | 8.1            | 17% |
| $F_{N-H-7}$ | Недостатньо інформації              | 7.1            | 24% |

Групі експертів (опит роботи в морі - більше 10 років, звання – старший помічник каптана чи вище) було запропоновано оцінити за шкалою від 1 до 10 вплив факторів  $F_{N-H-1}$  -  $F_{N-H-7}$  на імовірність виникнення небезпечної ситуації. З

результаті (табл. 7.1) видно, що всі фактори мають майже однаковий вплив. Треба відмітити, що зниження впливу цих факторів – довгостроковий процес, який згідно до ієрархії заходів зниження ризику (рис. 1.17) впроваджується на організаційному рівні. Моніторинг ефективності впроваджених організаційних заходів в цьому випадку можна проводити на базі зареєстрованих випадків небезпечних дій та небезпечних ситуацій, які відносяться одна до одної у пропорціях ілюстрованих на трикутнику Хайнриха (рис. 1.16).

На стадії планування найбільш детальний розрахунок граничних можливостей судна в заданих умовах (вітер, течія, хвилювання, щільність трафіку, доступний водний простір, глибини) за допомогою математичних моделей, імітації задач на навігаційних симуляторах, чи навіть фізичного експерименту дозволяють зменшити імовірність інцидентів.

Оцінка навігаційної безпеки включає аналіз ризику посадки на мілину. Зазвичай мореплавець має два параметри для оцінки:

- відстань до небезпеки;
- глибина небезпеки під водою.

Під час встановлення параметрів безпеки ECDIS виділено три зони ризику:

- зовні глибокого контуру (глибокий контур дорівнює двом осадкам судна);
- зовні контуру безпеки (контур безпеки дорівнює безпечній глибині);
- поза контуром безпеки.

На рис. 7.2 показано розділення району плавання на зони ризику залежно від співвідношення фактичної глибини  $h$  до безпечної  $D_{safe}$ .

Таким чином на стадії планування маршрут судна, заданий як множина  $\mathbb{R}$  з рядом параметрів:

$$\mathbb{R} = \langle WP(\varphi, \lambda), Rad, XTD(P, S), I \rangle \quad (7.2)$$

та множина навігаційних небезпек:

$$\mathbb{H} = \langle Haz(\varphi, \lambda, h, \tilde{h}), I \rangle, \quad (7.3)$$

не повинні перетинатися:

$$\mathbb{R} \cap \mathbb{H} = \emptyset \quad (7.4)$$

де  $\varphi, \lambda$ - географічні координати;  $h$  – глибина об'єкту (для підводних об'єктів);  $\tilde{h}$ - висота об'єкту (для мостів, кабелів, та інших подібних об'єктів).

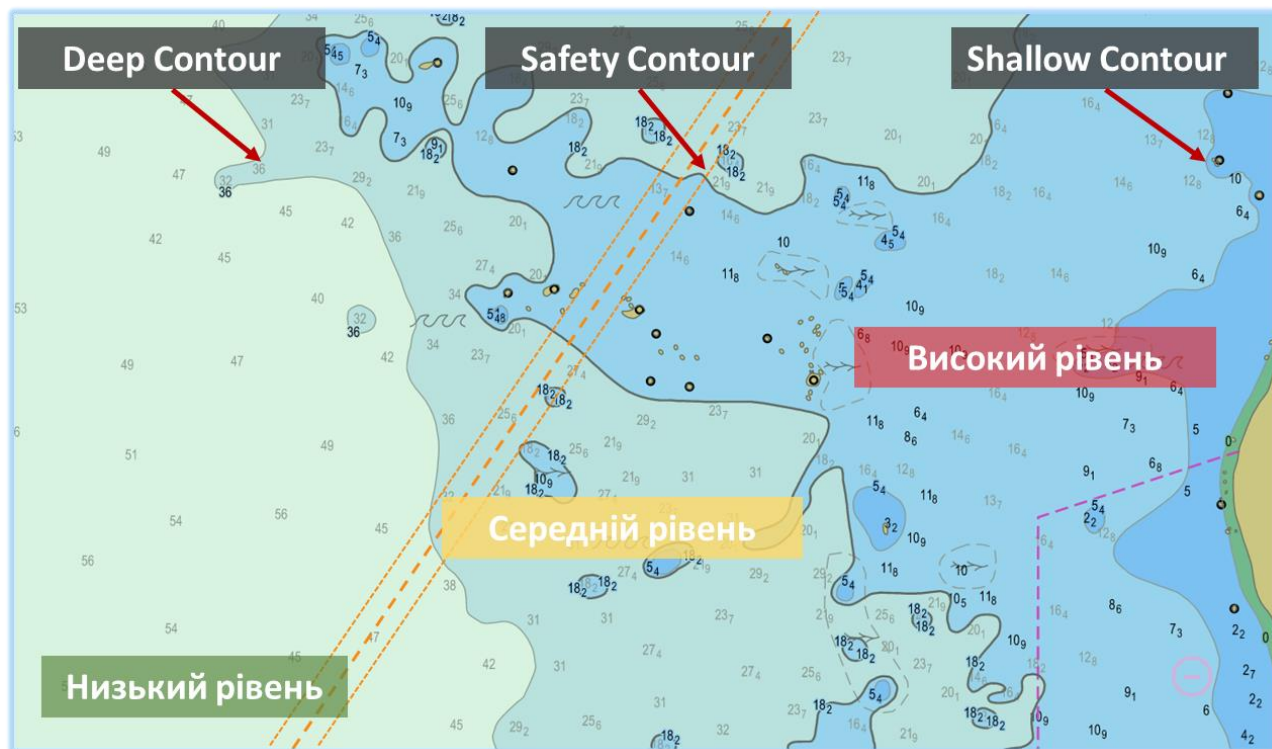


Рис. 7.2. Класифікація зон ризику для ЕКНІС

У багатоваріантних ситуаціях маневрування у стислих водах, чи в умовах щільного трафіку (рис. 7.3), насамперед важливо надати судноводіям інформацію про існуючі динамічних небезпеках, таких як інші судна, чи наближення до небезпечного у навігаційному відношенні об'єкту.

Тобто для оперативної оцінки ризику потрібно в першу чергу оцінювати параметри динамічної ситуації які безпосередньо впливають на імовірність та тяжкість наслідків зіткнення чи посадки на міліну.

Як показано на рис. 1.19 результатом навігаційного інциденту у звичайному випадку є *контакт* з іншим об'єктом (крім пошкодження судна чи вантажу викликаного погодними умовами).

Логічно припустити, що *ступень наслідків* ( $S$ ) при контакті залежить від швидкості, маси, кута контакту та характеристик матеріалів контактуючих об'єктів:

$$S = f(U, \nabla, \alpha, \gamma), \quad (7.5)$$

де  $U$  – швидкість;  $\nabla$  – маса судна;  $\alpha$  – кут очікуваного контакту;  $\gamma$  – характеристика контактуючих матеріалів.

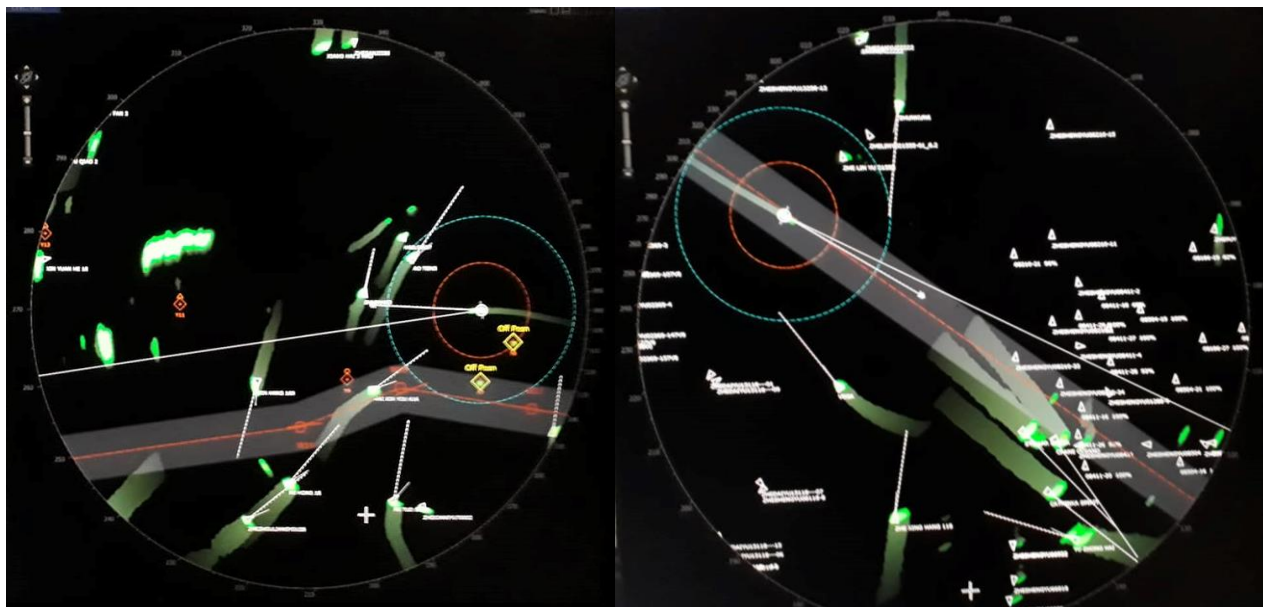


Рис. 7.3. Судноводіння в умовах щільного трафіку

Кінетична енергія, яка передається під час контакту тілом дорівнює:

$$E_k = 0.5 \nabla U^2 \quad (7.6)$$

Сила удару від зіткнення суден на зустрічних курсах очевидно буде більшою ніж на попутних, коли швидкість взаємного зближення відносно мала. На рис. 7.4 показано залежність швидкості взаємного зближення від куту перетину курсів. Звідси спрощену тяжкість наслідків запропонуємо оцінювати як:

$$S = U_c^2 \quad (7.7)$$

де  $U_c$  – швидкість зближення з небезпекою або взаємного зближення суден.

Швидкість взаємного зближення 2-х суден залежить також від кута перетинання курсів, та швидкостей суден, отже:

$$U_c^2 = U_{V1}^2 + U_{V2}^2 - 2U_{V1}U_{V2} \cos(\pi - \alpha) \quad (7.8)$$

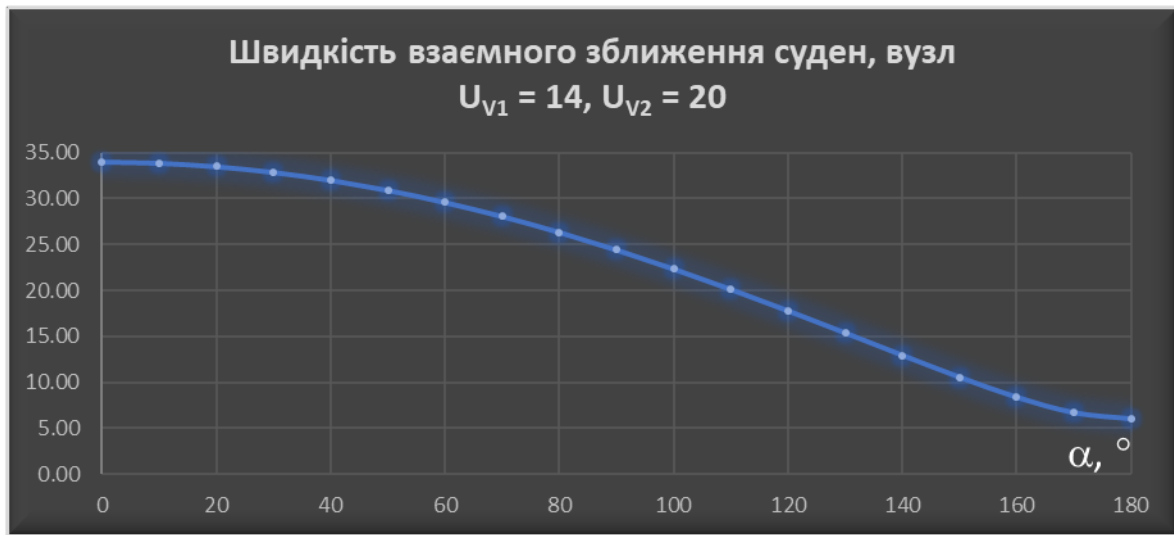


Рис. 7.4. Залежність швидкості взаємного зближення від куту перетину курсів

З іншого боку, кут контакту впливає на пошкодження суден. Так найбільші пошкодження судно отримає, якщо інше судно зіткнеться з ним під кутом  $90^\circ$ .

Математично таку залежність можна відобразити як (рис. 7.4):

$$S = \left( U_c \times (1 + \sin(\alpha)) \right)^2 \quad (7.9)$$

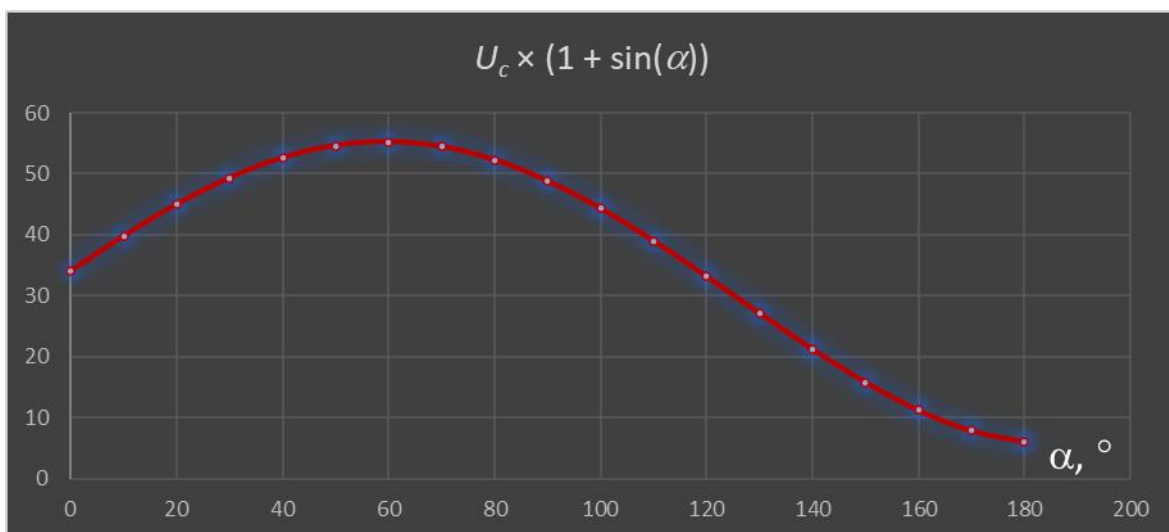


Рис. 7.5. Скоригований на кут взаємного зближення параметр оцінки тяжкості наслідків

Імовірність ( $P$ ) залежить від ряду чинників, зокрема від: часу і дистанції найкоротшого зближення, дистанції між суднами, розмірів суден і їх маневреності, погодних умов.

Визначальним фактором, при цьому, є час найкоротшого зближення ( $TCPA$ ). Таким чином, якщо  $CPA$  (дистанція найкоротшого зближення) = 0, у спрощеному вигляді імовірність можна представити пропорційною до  $TCPA$ :

$$P = \frac{1}{TCPA} \quad (7.10)$$

Таблиця 7.2. Матриця ризиків розрахована спрощеним методом

| Ризик                                                                                                             |    | TCPA, годин |      |     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------------|------|-----|------|
|                                                                                                                   |    | 1           | 0.75 | 0.5 | 0.25 |
| $U_c$ , вузли                                                                                                     | 1  | 1           | 1.33 | 2   | 4    |
|                                                                                                                   | 5  | 25          | 33   | 50  | 100  |
|                                                                                                                   | 10 | 100         | 133  | 200 | 400  |
|                                                                                                                   | 20 | 400         | 533  | 800 | 1600 |
| 0 – 99 – низький рівень ризику; 100 – 199 – середній рівень ризику; 200 – 499; >500 - неприйнятний рівень ризику. |    |             |      |     |      |

Звідси ризик:

$$R = P \times S = \frac{U_c^2 \times (1 + \sin(\alpha))}{TCPA} \quad (7.11)$$

У таблиці 7.2 представлено матрицю ризиків розраховану за рівнянням, з кутом очікуваного контакту  $\alpha = 0^\circ$ .

## 7.2 Оцінка навігаційних ризиків на основі неоднорідних параметрів

Проблемою підходу описаного рівняннями (7.1) - (7.11) є те, що ранжування границь ризику у такому випадку є суб'єктивним, та може значно відрізнятись для різних типів суден і навіть ситуацій. Щоб обґрунтувати на базі обчислень ступень наслідків, запропонуємо використовувати «енергетичний» підхід для визначення безпечної швидкості контакту  $U_s$  через абсорбовану енергію  $E_a$ , яка характеризує відсутність пошкодження конструкції корпусу при контакті:

$$U_S = \sqrt{\frac{2E_a}{\nabla}} \quad (7.12)$$

Тобто виконується умова:

$$E_K < E_a \quad (7.13)$$

$$E_K = \frac{1}{2} \nabla U_c^2 \quad (7.14)$$

Так наприклад, на основі аналізу робіт [215, 189, 222] можна зробити висновок, що при зіткненні під кутом  $90^\circ$  двох великотоннажних (50000 т) суден на швидкості до 2 вузлів не виникне значних пошкоджень, а на швидкостях до 5 вузлів не буде пробито подвійний борт судна (рис. 7.6).

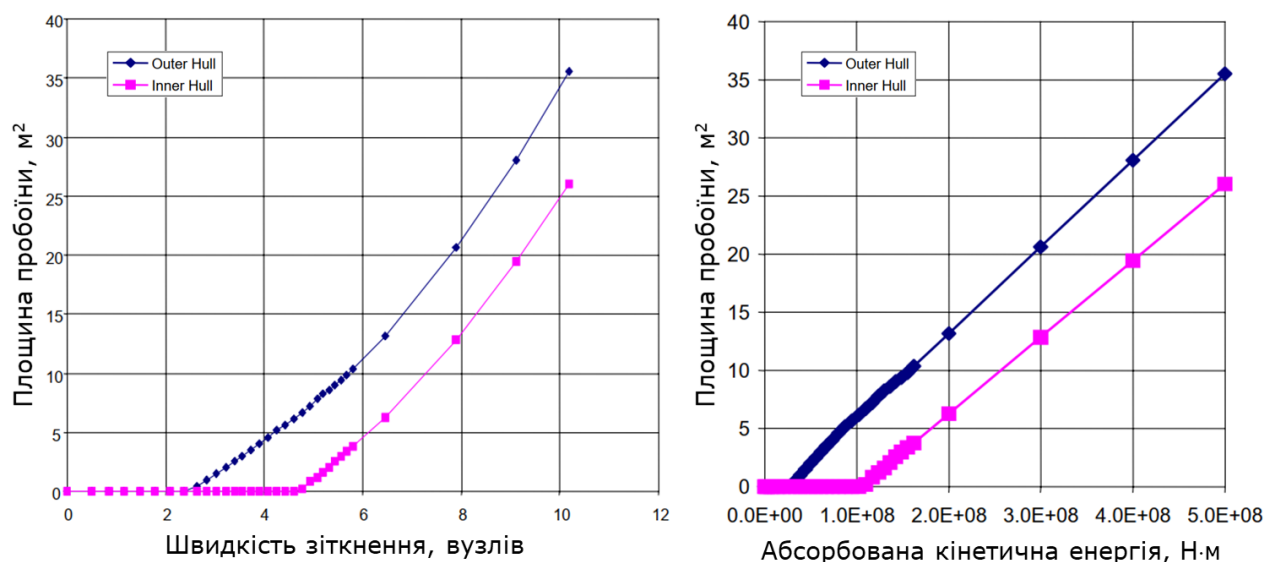


Рис. 7.6. Характеристики зіткнення танкера з подвійним бортом водотоннажністю 80000 т. з контейнеровозом водотоннажністю 50000 т. під кутом  $90^\circ$

Звідси нормоване значення швидкості контакту може бути визначено наступним чином:

$$U_N = \frac{U_c}{U_S(E_a)} \quad (7.15)$$

Окрім часу найкоротшого зближення ( $TCPA$ ) на імовірність контакту з об'єктом впливають дистанція найкоротшого зближення ( $CPA$ ) та спроможність судна виконати маневр за наданий час ( $TCPA$ ), що у свою чергу може бути



виражено відношенням дистанції до точки контакту ( $DTCP$ ) до мінімальної дистанції до розрахункової точки контакту ( $MDTCP$ ), яка визначається рівнянням (6.2):

$$DTCP_N = \frac{DTCP}{MDTCP(\alpha, S, S_t)} \quad (7.16)$$

Нормовані значення часу найкоротшого зближення ( $TCPA$ ) та дистанції найкоротшого зближення ( $CPA$ ) можуть бути отримані наступним образом:

$$TCPA_N = \frac{TCPA}{TCPA_S(U, S)} \quad (7.17)$$

$$CPA_N = \frac{CPA}{CPA_S(\alpha, S)} \quad (7.18)$$

де  $TCPA_S$  – час, який визначено як безпечний виходячи з часу потрібного на виконання маневру у заданому режимі управління;  $CPA_S$  – дистанція, яку визначено як безпечну.

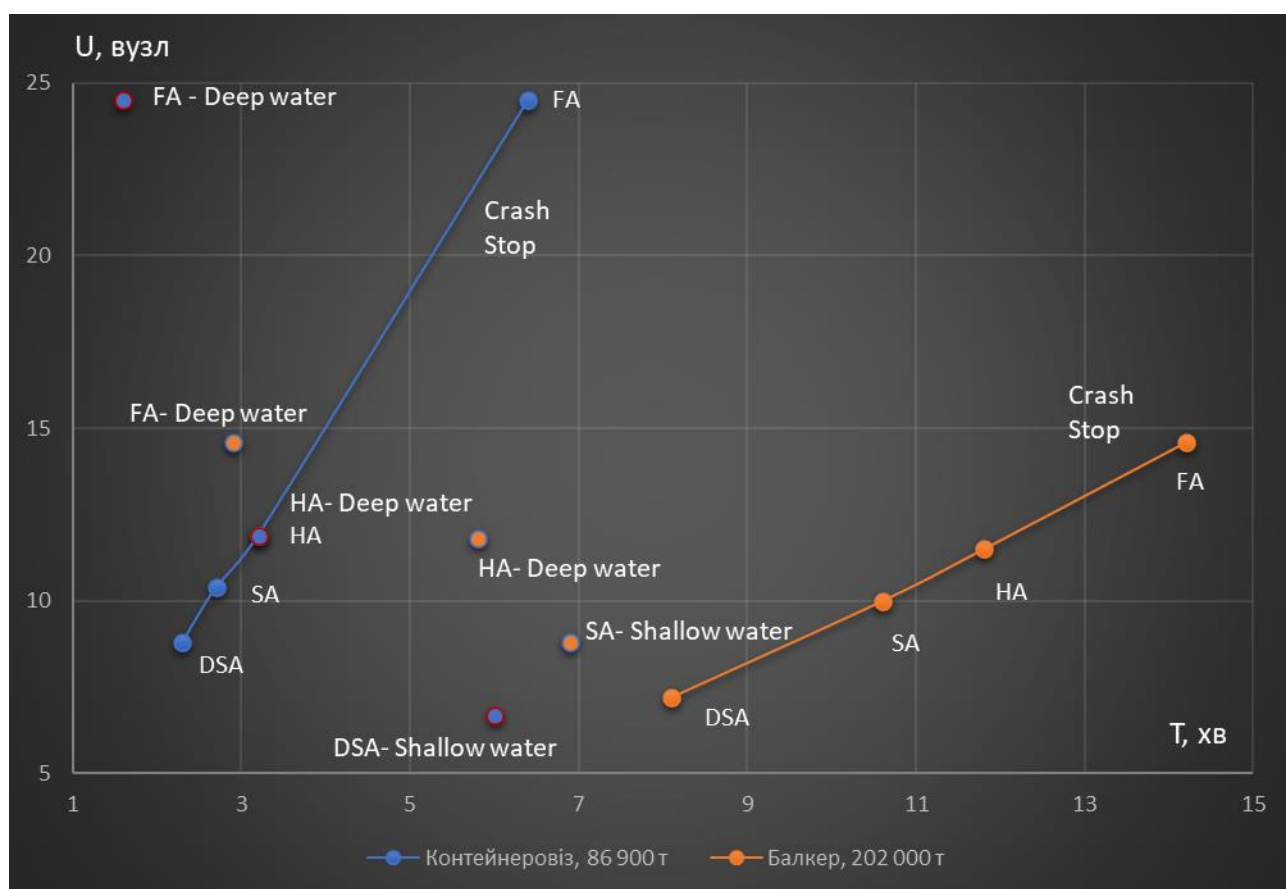


Рис. 7.7. Порівняння часу активного гальмування, та повороту на кут 90° балкера та контейнеровоза

На рис. 7.7 наведено дані про залежність часу маневру від початкової швидкості для аварійного гальмування та повороту судна на  $90^\circ$ . Виходячи з аналіз графіків можна зробити наступні висновки:

- гальмування, у цілому, повільніший процес;
- поворот судна відносно часу виконання маневру є більш ефективним;
- початкова швидкість судна значною мірою впливає на час маневру;
- мілководдя ( $h/T < 2$ ) також впливає на час маневру.

Проте якщо водний простір не дозволяє виконати значний поворот, найбільш ефективною буде комбінація отвороту з послідовним аварійним гальмуванням. На прикладі великотоннажного контейнеровозу (рис. 7.8) видно, що розворот з гальмуванням дозволяє повністю зупинити судно за 5.3 хвилини з вибігом 4 кб. Аварійне гальмування без розвороту займе 7.5 хвилин з пробігом майже 8 кб. Отворот без гальмування, у свою чергу, займе 3.3 хвилини.

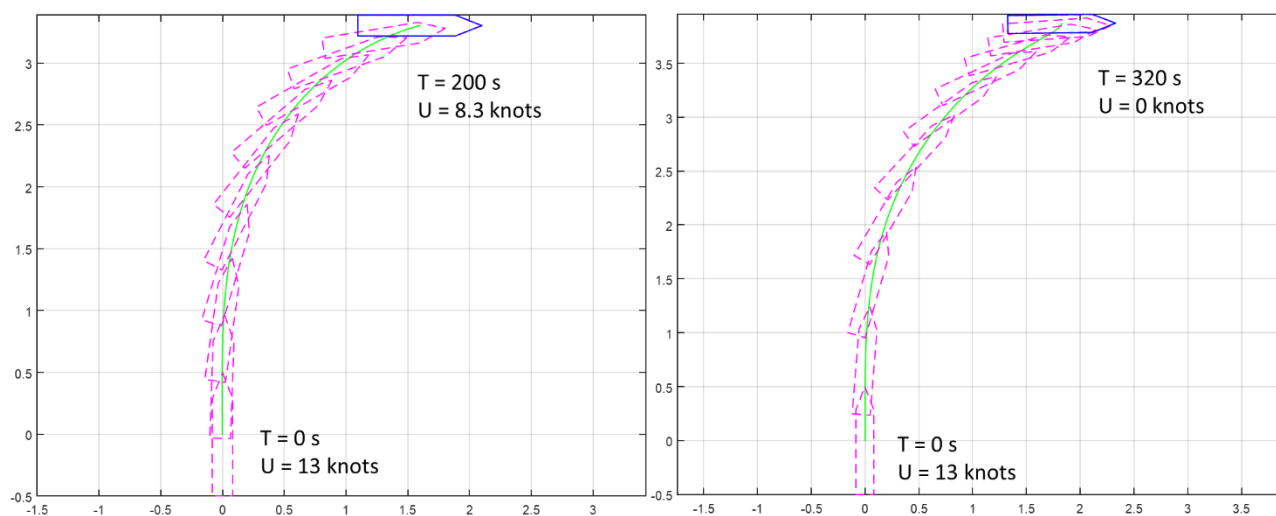


Рис. 7.8. Порівняння маневру стерном ( $\delta=35^\circ$ ) та маневру стерном у комбінації з повним заднім ходом. Судно – контейнеровоз 10000 TEU

Відповідно міркуванням наведеним вище, мінімальний час до точки контакту вважається безпечним, якщо він більший ніж час потрібний на аварійний маневр, який дорівнює часу відвороту на  $90$  градусів при даній швидкості судна та максимальному зусиллю на стерні, якщо дозволяє водний простір (простір навколо судна не обмежено в границях діаметру циркуляції) або

часу аварійного гальмування в залежності від швидкості судна до початку маневру.

$$\left. \begin{aligned} TCPA_S &= f_{turn}(U), D_{turn} < D_{\perp Hazard} \\ TCPA_S &= f_{c-stop}(U), D_{turn} > D_{\perp Hazard} \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

де  $f_{turn}(U)$  – залежність часу, необхідного на розворот судна на 90 градусів від швидкості судна;  $f_{c-stop}(U)$  – залежність часу, необхідного на аварійну зупинку судна реверсом;  $D_{turn}$  – діаметр циркуляції;  $D_{\perp Hazard}$  – відстань до небезпеки перпендикулярна ДП судна.

З урахуванням співвідношень (7.19) запропонуємо класифікацію ризиків, яку можна застосовувати на стадії планування маршруту судна у вигляді таблиці 7.3.

Таблиця 7.3. Заходи гарантування безпеки відповідно до зон ризику

| Ризик                              | Низький                                                                                 | Середній                                                                                                                                                    | Високий                                                                                                                                              |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Характеристика</b>              | <b>Зовні глибокого контуру</b><br>$h > 2 \times T_{static}$<br>$TCPA > 3 \times TCPA_S$ | <b>Зовні контуру безпеки</b><br>$h > D_{safe}$<br>$TCPA < 3 \times TCPA_S$                                                                                  | <b>Поза контуром безпеки</b><br>$h$ може бути $< D_{safe}$<br>$TCPA < 2 \times TCPA_S$                                                               |
| <b>Заходи гарантування безпеки</b> | Додаткових дій не потрібно.<br>Стандартні заходи забезпечення вахти                     | розглянути рівні комплектування;<br>частоту перевірки положення;<br>готовність двигуна;<br>точний розрахунок УКС є обов'язковим для кожної ділянки маршруту | No-Go зони;<br>альтернативний маршрут;<br>приливне вікно;<br>погодне вікно;<br>безпечна швидкість;<br>точки неповернення;<br>безпечна якірна стоянка |

Для визначення мінімально допустимої дистанції розходження в обмежених водах запропонована наступна формула:

$$CPA_{min} = (SF_L \times L \times \sin(\alpha) + SF_B \times B \times |\cos(\alpha)|) / L \quad (7.20)$$

де  $CRA_{min}$  – мінімально допустима дистанція розходження;  $L$  – довжина судна;  $B$  – ширина судна;  $\alpha$  – кут перетину курсів, °;  $SF_L$  – поздовжній коефіцієнт безпеки;  $SF_B$  – поперечний коефіцієнт безпеки;

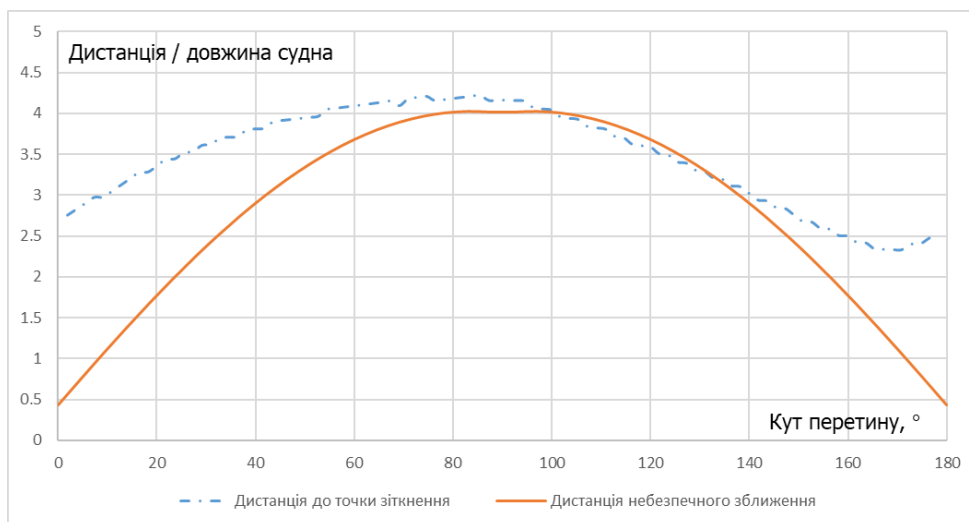


Рис. 7.9. Дистанція останнього маневру для розходження поворотом вправо і дистанція небезпечного зближення в залежності від кута перетину курсів для судна довжиною 282 м, шириною 32,2 м з коефіцієнтами безпеки  $SFL = SFB = 4$

Вибір змінної CPA обумовлений тим, що при зближенні у вузькості на протилежних або попутних курсах досить важко і через обмеження навігаційного характеру не завжди практично можливо підтримувати велику дистанцію між суднами. З іншого боку, якщо акваторія дозволяє суднам зближуватися під кутами близькими до перпендикулярних, судноводії повинні підтримувати певний запас по дистанції, щоб залишити місце для маневру.

Приклад розрахованої таким чином змінної CPA показаний на рис.7.9.

Таким чином, імовірність контакту (зіткнення чи посадки на міліну) визначається як

$$P_c = \frac{1}{TCRA_N \times CPA_N \times DTCP_N} \quad (7.21)$$

### 7.3 Оцінка навігаційних ризиків за допомогою нечіткої логіки

Для того щоб реалізувати формалізований перехід від кількісної до зрозумілою оператору якісної оцінки, запропонуємо використання моделі оцінки навігаційної безпеки, що представляє собою систему нечітких продукційних

моделей (рис. 7.10), побудовану на базі теорії «нечіткої логіки», згідно до алгоритму наведеного на рис. 7.11.

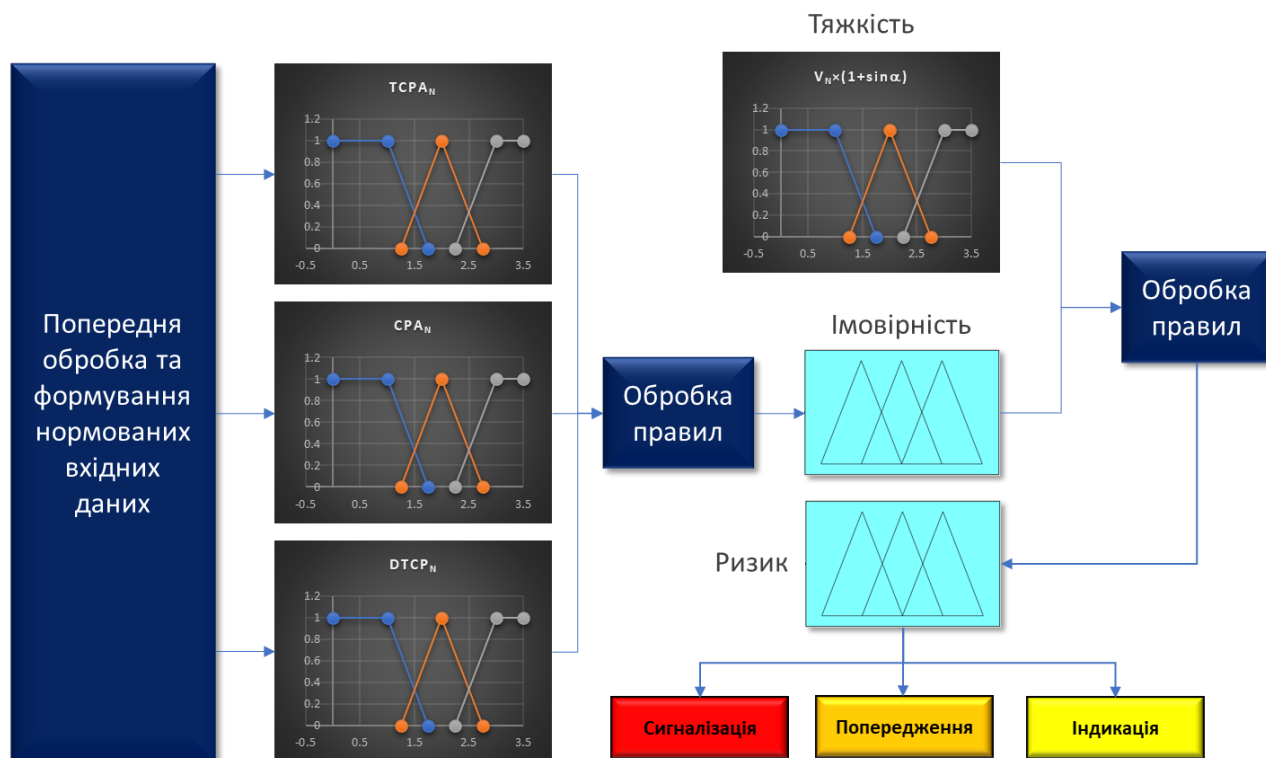


Рис. 7.10. Структура нечітко-логічної системи оцінки ризику зіткнення чи посадки на міліну

Наведена модель складається з двох FIS-модулів (fuzzy inference system - система нечітко-логічного висновку [269]): «імовірність» та «ризик».

Процес формування FIS-модулей поділимо на наступні:

ЕТАП 1. Визначення функцій приналежності  $\mu$  чітких вхідних  $x$  та вихідних  $y$  змінних нечітким лінгвістичним множинам  $A$  і  $B$ . Що включає в себе формування простих нечітких висловлювань в передумовах і висновках правил і статистичну оцінку приналежності заданих параметрів наведеним висловлюванням. Загальні принципи визначення функцій приналежності в задачах нечіткої логіки викладені в роботі [269].

ЕТАП 2. Формування бази нечітких продукційних правил  $\Pi$  на основі отриманих нечітких лінгвістичних множин  $A$  і  $B$ . При формуванні бази правил важливим є забезпечення її повноти і несуперечності.

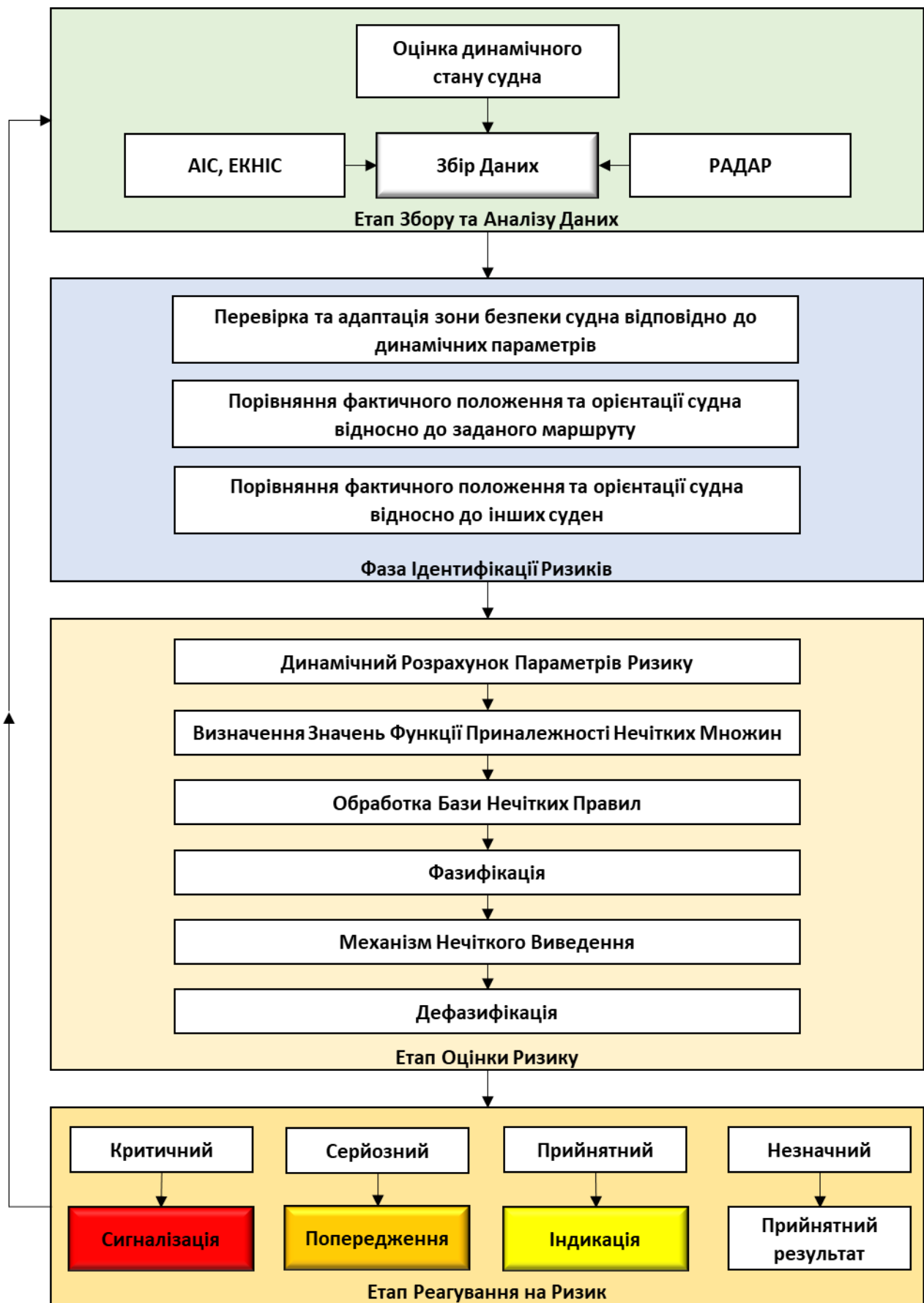


Рис. 7.11. Алгоритм роботи нечітко-логічної системи оцінки ризику зіткнення чи посадки на міліну

ЕТАП 3. Визначення алгоритму нечіткого виведення. На сьогоднішній день існує ряд стандартних алгоритмів нечіткого виведення, таких як алгоритм Мамдані, Такагі-Сугено, Цукамото, Ларсена і ін.

У нашому випадку обидва FIS-модулі являють собою MISO (multi-input-single-output) структури і побудовані на базі алгоритму нечіткого висновку Мамдані [227, 142], який має властивості, описані нижче:

■ База нечітких продукційних правил для даної структури формується на основі правил вигляду:

$$\begin{aligned} & \Pi_i: \textbf{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \textbf{ AND } \cdots \textbf{ AND } x_j \text{ is } A_{ij} \textbf{ AND } \cdots \textbf{ AND } x_m \text{ is } A_{im} \\ & \textbf{ THEN } \tilde{y} \text{ is } B_i, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (7.22)$$

де  $x_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) – вхідні змінні,  $x_j \in X_j$ ,  $X_j$  – область визначення відповідної передумови;

$\tilde{y}$  – нечітка вихідна змінна,  $\tilde{y} \in Y$ ,  $Y$  – область визначення відповідного висновку;

$A_{ij}$ ,  $B_i$  – нечіткі множини, визначені на  $X_j$  і  $Y$  з функціями належності  $\mu_{A_{ij}}(x_j) \in [0,1]$  и  $\mu_{B_i}(y) \in [0,1]$  відповідно.

■ Декартовий добуток нечітких множин задається виразом:

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m} = \min \{ \mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_m}(x_m) \} \quad (7.23)$$

- Нечітка імплікація - операція min-кон'юнкція.
- Т-норма - min- кон'юнкція.
- Акумуляування активізованих висновків правил - max-диз'юнкція.

Розглянемо роботу алгоритму Мамдані на прикладі MISO структури з двома входами і одним виходом. Нечітку модель і механізм нечіткого виведення представимо як:

$$\begin{aligned} \mu_{B_i}(y) &= \max_{i=1,2} \sup_{x \in X} \left\{ \min \left[ \mu_{A_i}(x), \mu_{A_i \rightarrow B_i}(x, y) \right] \right\} = \\ &= \max_{i=1,2} \sup_{x_1, x_2 \in X} \left\{ \min \left[ \mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), \mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), \mu_{B_i}(y) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7.24)$$

На рис. 7.12 ілюструється приклад виконання алгоритму нечіткого висновку Мамдані.

Правило 1:

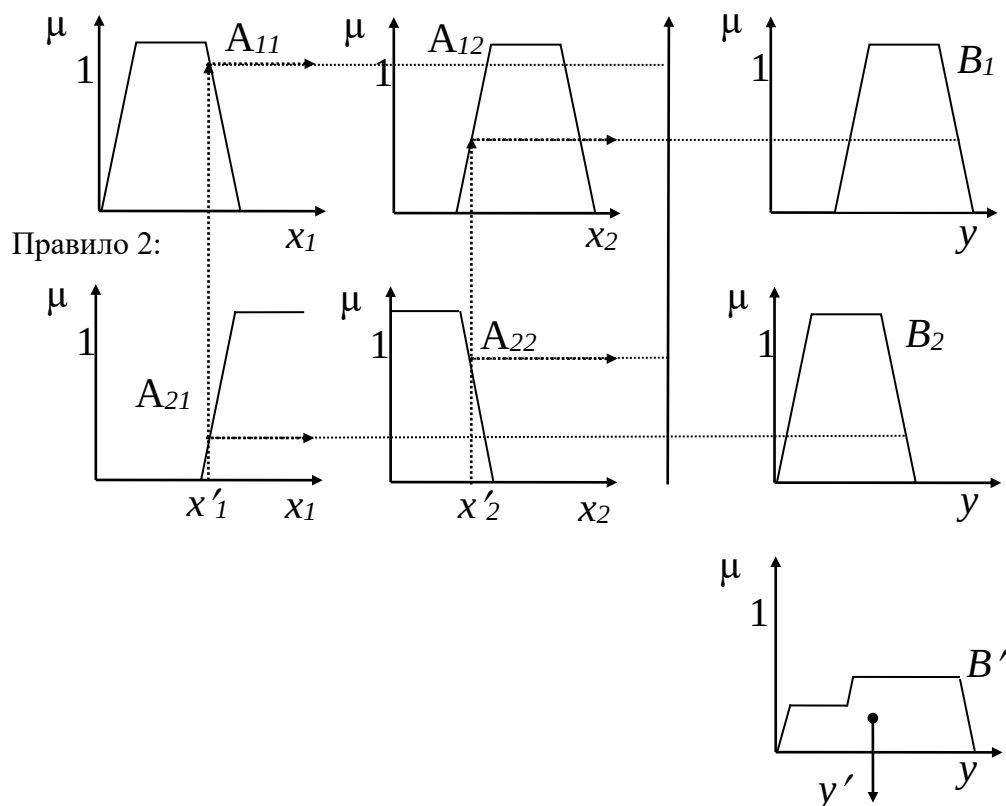


Рис. 7.12. Ілюстрація алгоритму нечіткого виведення

1. Введення нечіткості - визначення ступеня спрацювання (істинності) кожної передумови кожного правила для заданих значень вхідних змінних  $\mu_{A_{ij}}(x'_j), (i, j = 1, 2)$ .

2. Агрегування ступенів істинності передумов по кожному з правил  $\alpha_i$ :

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \min\{\mu_{A_{11}}(x_1), \mu_{A_{12}}(x_2)\}, \\ \alpha_2 &= \min\{\mu_{A_{21}}(x_1), \mu_{A_{22}}(x_2)\}.\end{aligned}\tag{7.25}$$

3. Активізація висновків по кожному з правил на основі операції  $\min$ -активізації:

$$\begin{aligned}\mu_{B_1}(y) &= \min\{\alpha_1, \mu_{B_1}(y)\}, \\ \mu_{B_2}(y) &= \min\{\alpha_2, \mu_{B_2}(y)\}.\end{aligned}\tag{7.26}$$



4. Акумулявання отриманих на попередньому етапі значень за всіма правилами. Визначення знайдених усічених нечітких множин проводиться з використанням операції максимум (max-диз'юнкції). В результаті формується нечітка множина для вихідної змінної з функцією приналежності

$$\mu_{B'}(y) = \max\{\mu_{B_1}(y), \mu_{B_2}(y)\} \quad (7.27)$$

5. Приведення до чіткості. В даному випадку будемо використовувати центроїдного метод дефазифікації, при якому чітке значення вихідної змінної  $y$  визначається як «центр ваги» для  $\mu_{B'}(y)$ :

$$y' = \frac{\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} y \mu_{B'}(y) dy}{\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} \mu_{B'}(y) dy}, \quad (7.28)$$

де  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$  – межі інтервалу носія нечіткої множини вихідної змінної  $y$ .

Як описано вище першим етапом формування FIS-модулів є визначення функцій приналежності  $\mu$  чітких вхідних  $x$  і вихідних  $y$  змінних нечітким лінгвістичним множинам  $A$  і  $B$ . В рамках розв'язуваної задачі вхідними змінними модуля «імовірність» є нормовані дистанція ( $CRA$ ) та час ( $TCRA$ ) найкоротшого зближення, а також дистанція до точки зіткнення ( $DTCP$ ), модуля «ризик» – нормована швидкість наближення до небезпеки. Лінгвістичні множини для кожного з параметрів системи в свою чергу є критеріями їх оцінки. Тобто, наприклад, встановивши відповідність (визначивши функцію приналежності) між  $CRA$  і лінгвістичним множиною  $A = \{\text{рівень небезпеки «низький», «середній», «високий»}\}$ , ми отримуємо багаторівневий критерій оцінки по параметру « $CRA$ ». Перший крок у вирішенні цього завдання був зроблений при проведенні статистичного опитування судноводіїв (ДОДАТОК А). Відповідна обробка отриманих даних і додатковий аналіз досліджуваних параметрів

(порівняння з існуючими міжнародними правилами, що стосуються питань маневрування судна, додатковий теоретичний аналіз параметрів руху для заданого типу судна) дозволяють отримати відповідні функції приналежності і на їх основі сформувані бази правил.

Нижче розглянемо задачу формування функцій приналежності на основі експертного опитування в комбінації з методами отриманими в попередніх частинах цієї роботи. З огляду на схожість алгоритму розрахунку функцій приналежності детальний процес розрахунку відображений тільки для першого з описуваних критеріїв, для всіх інших подібні розрахунки проводяться аналогічно.

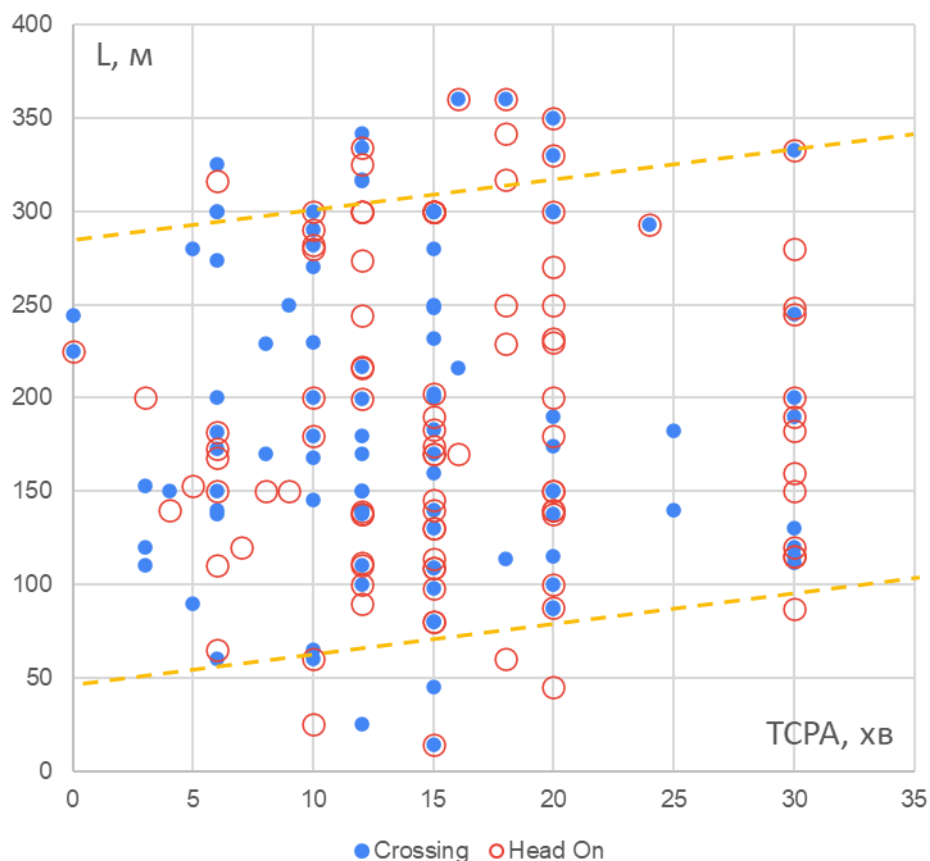


Рис. 7.13. Співвідношення мінімального значення  $TCPA$  на початок маневру від вказаної опитуваними довжини судна

#### 1) Час до найкоротшого зближення

Як показано у параграфі 7.2, оцінка часу найкоротшого значною мірою залежить від маневрених характеристик судна, а саме його спроможності

виконати своєчасний маневр для уникнення небезпеки, що у свою чергу залежить від швидкості судна на початку маневру, що наглядно відображено на рис. 7.7. Цікаво, що результати експертного опитування (викладачі з досвідом роботи в морі, аудитори) та опитування судноводіїв усіх рангів з досвідом роботи від 1 до 30 років показало, що у ситуації *Stand On Vessel* у 50% випадків судноводії не співвідносять *TCPA* та швидкість судна. Також взагалі спостерігається слаба кореляція між розмірами та типами суден та обраним значенням *TCPA*.

В розробленій для експертного опитування анкеті *TCPA* розділені на три категорії, позначені лінгвістичними термами: ступінь небезпеки «високий», «середній», «малий».

Нижче наведемо алгоритм визначення функцій приналежності для заданих термінів для часу найкоротшого зближення.

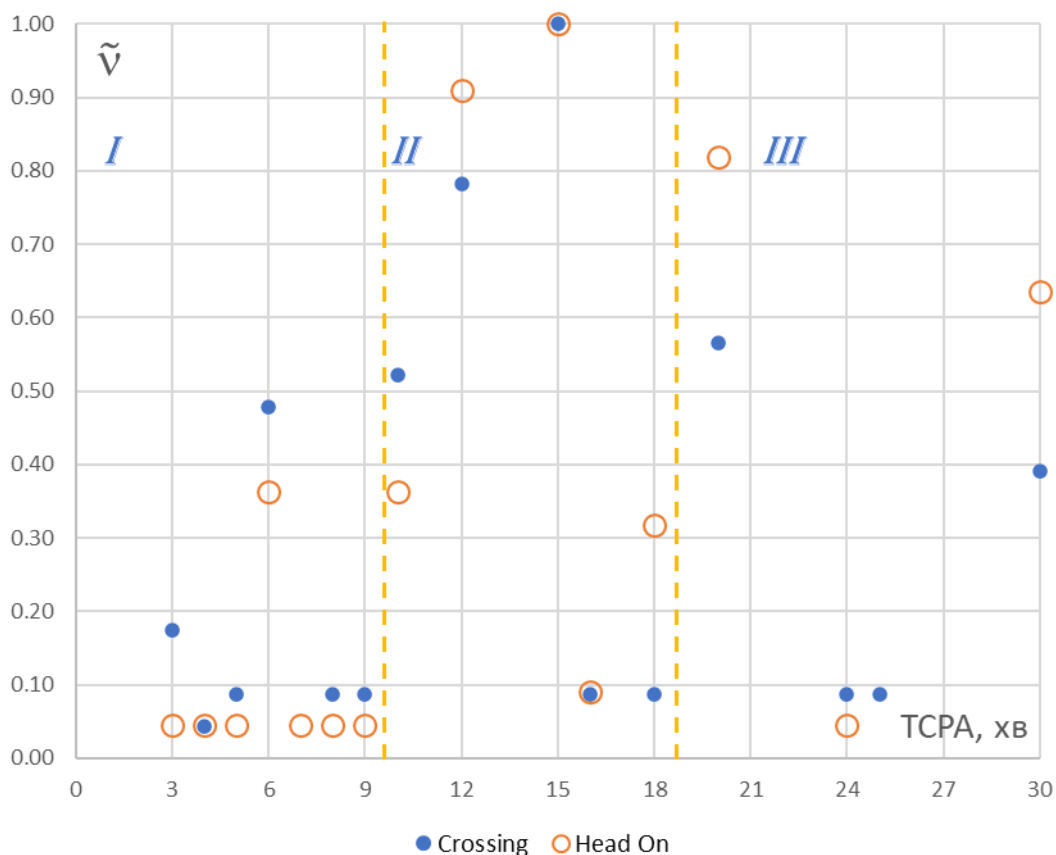


Рис. 7.14. Відносна частота повторення мінімального значення *TCPA* на початок маневру по результатам опитування судноводіїв

Знайдемо чисельний проміжок, на якому судноводіями визначено термін:

$$p \in (0, \text{round}\langle \max\{\mathcal{P}^*\} \rangle \cdot s), p = 0, 1, 2, \dots, \text{round}\langle \max\{\mathcal{P}^*\} \rangle \cdot s \in \mathbb{N} \quad (7.29)$$

де  $\mathcal{P}^*$  - множина значень, вказаних респондентами під час опитування;  $p$  – масштабований параметр;  $s$  – масштаб для приведення параметру  $p^*$  у простір натуральних чисел.

*Знайдемо частоту повторення для кожного з параметрів  $p^*$  на заданому числовому проміжку.*

Визначмо параметри:

$I$  – кількість значень параметра на заданому проміжку при заданому кроці;

$J$  – кількість опитуваних.

Задаймо програмний цикл виду:

```

FOR  $i = 0, 1, 2, \dots, I$ 
  FOR  $j = 1, 2, \dots, J$ 
    IF  $p(i) = p^*(j)$ ,
      THEN  $v(i) = v(i) + 1$ ;
    ELSE
       $v(i) = v(i)$ .
     $i = i + 1; j = j + 1$ .
END
  
```

(7.30)

де  $v$  – частота повторення значення.

Визначимо відносну частоту повторення параметру як

$$\tilde{v} = \frac{v}{\max\{v\}} \quad (7.31)$$

Для зручності аналізу отриманих результатів відобразимо залежність  $\tilde{v}(p)$  для терміну «середній» ТСРА графічно (рис. 7.14).

З 105 опитаних 22 судноводії вважають безпечним почати маневр у проміжку 3-9 хв, 57 – 10-18 хв, 26 – 19-30 хв. З рис. 7.14 видно, що на трьох

вказаних проміжках часу є локальні максимуми: 6, 15 та 20 хвилин. Для того щоб побудувати функції приналежності з найменуваннями LOW, MEDIUM, HIGH відповідно, проведемо аналіз зон I, II та III відповідно до (7.29) - (7.31).

В якості опції приналежності для нечіткої оцінки параметрів стану судна будемо використовувати симетричну функцію Гаусса виду:

$$\mu(x, \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (7.32)$$

де  $c$  – локальне середньо статистичне значення;  $\sigma$  – локальне середньоквадратичне відхилення.

Функції (7.32) в графічному вигляді відображені на рис. 7.15.

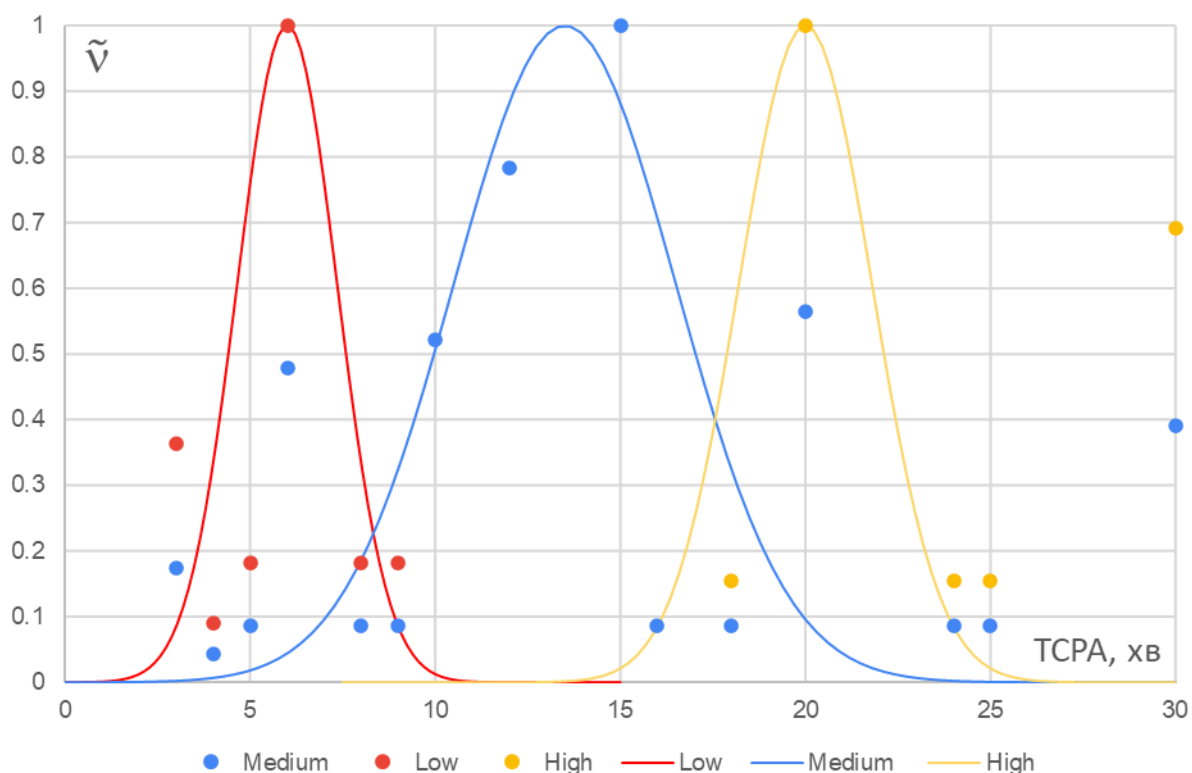


Рис. 7.15. Відносна частота та функції приналежності повторення мінімального значення  $TSPA$  на початок маневру по результатам опитування судноводіїв

З рис. 7.15 видно, що функції (7.32) ближче до країв прямують до 0, що у свою чергу веде до невизначеності де-фазифікованного висновку. Тому додамо умову насиченості функції (7.32) на крах відносно локального максимуму.

$$\mu_{low}(\hat{x}) = e^{\frac{-(\hat{x}-\hat{c})^2}{2\hat{\sigma}^2}}, x \geq \max\{x_{low}\} \quad (7.33)$$

$$\mu_{low}(\hat{x}) = 1, x < \max\{x_{low}\}$$

$$\mu_{med}(\hat{x}) = e^{\frac{-(\hat{x}-\hat{c})^2}{2\hat{\sigma}^2}} \quad (7.34)$$

$$\mu_{high}(\hat{x}) = e^{\frac{-(\hat{x}-\hat{c})^2}{2\hat{\sigma}^2}}, x \leq \max\{x_{high}\} \quad (7.35)$$

$$\mu_{low}(\hat{x}) = 1, x > \max\{x_{high}\}$$

де  $\hat{x} = p/\max\{p\} \in \langle 0,1 \rangle$  – нормоване значення параметру.

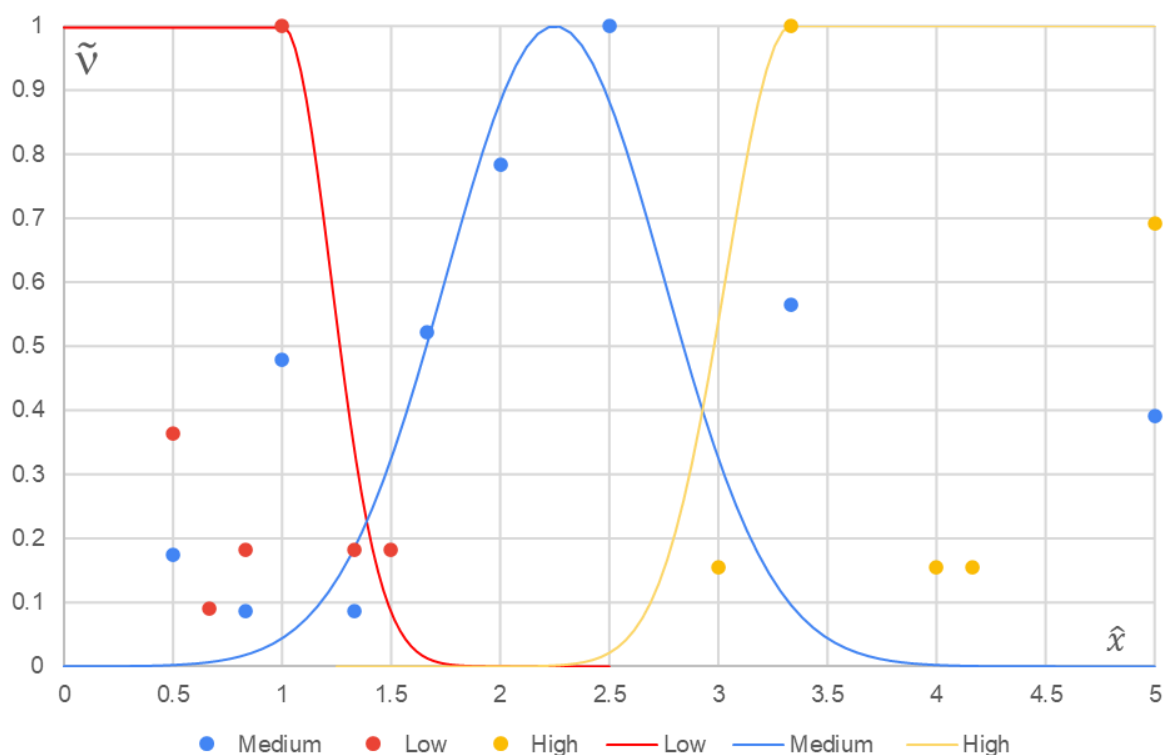


Рис. 7.16. Функції приналежності мінімального значення ТСРА на початок маневру

По аналогії з вищеописаною процедурою були отримані функції приналежності дистанції найкоротшого наближення СРА (рис. 7.17) .

На відміну від СРА та ТСРА тяжкість наслідків (S) та дистанцію до точки контакту (DTCP) не доцільно оцінювати за допомогою експертного опитування. За відсутністю статистичних даних також не доцільно використовувати форму функції нормального розподілу (7.32) у якості функції приналежності. Тому для цих параметрів у якості функцій приналежності будемо використовувати трикутники посередині шкали значень відносного параметру та напівтрапеції по її краям.

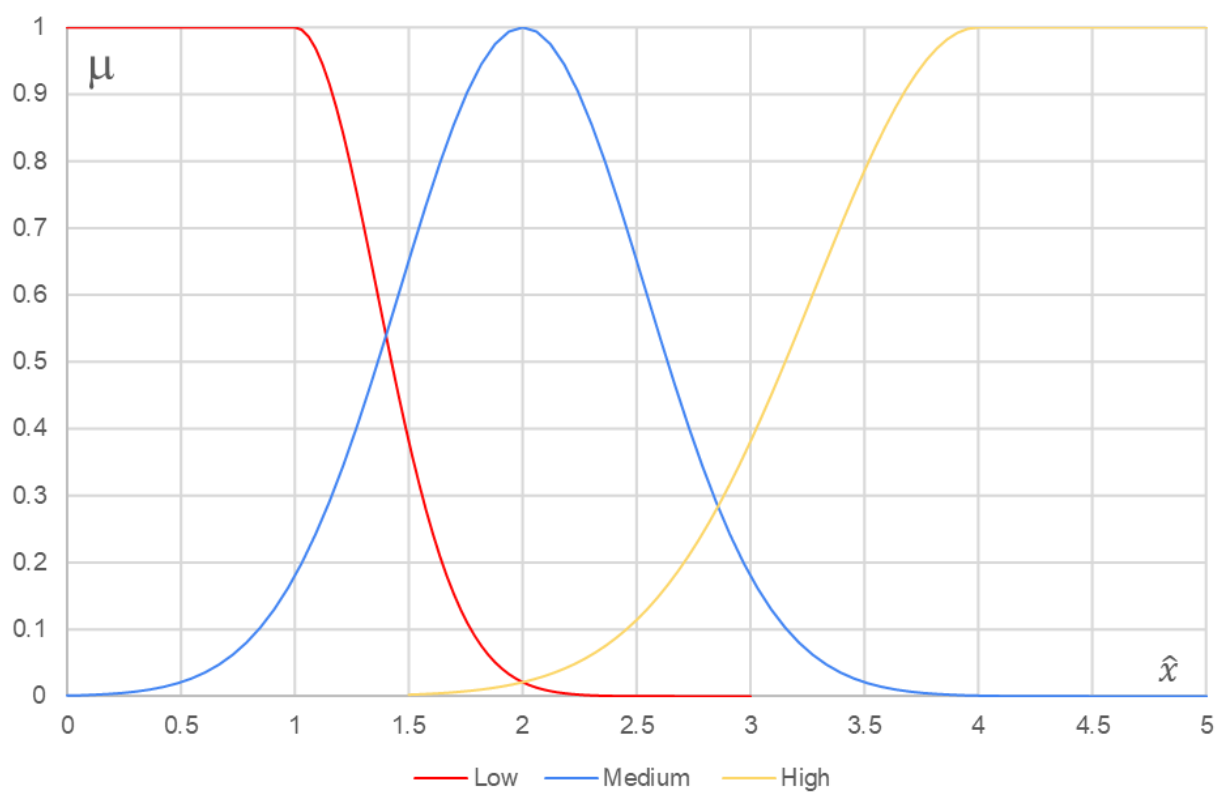


Рис. 7.17. Функції приналежності дистанції найкоротшого наближення СРА

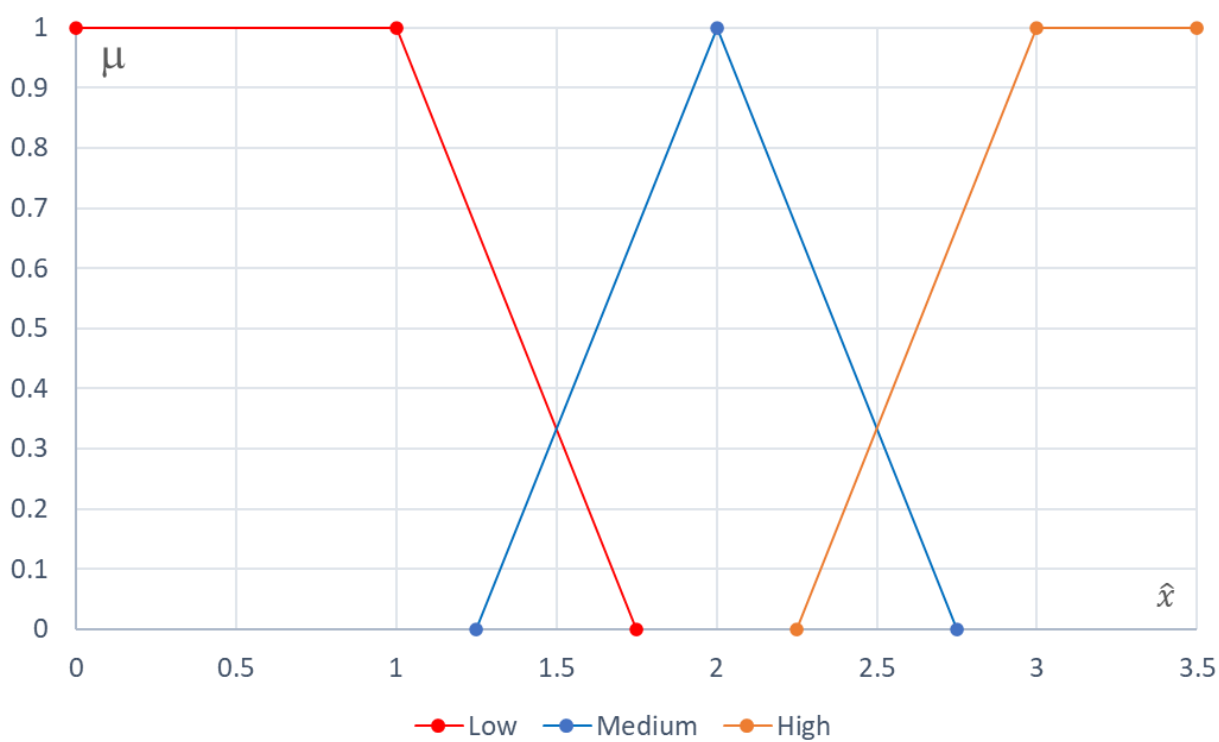


Рис. 7.18. Функції приналежності тяжкості наслідків (S) та дистанції до точки контакту (DTCP)

Далі формуються таблиці правил для послідовної оцінки імовірності та ризику (таблиці 7.4 та 7.5).

Таблиця 7.4. Набор правил FIS “Імовірність”

| TCPA   | CPA    | DTCP   | LIKELYHOOD |
|--------|--------|--------|------------|
| LOW    | LOW    | LOW    | HIGH       |
| LOW    | LOW    | MEDIUM | HIGH       |
| LOW    | LOW    | HIGH   | HIGH       |
| LOW    | MEDIUM | LOW    | HIGH       |
| LOW    | MEDIUM | MEDIUM | HIGH       |
| LOW    | MEDIUM | HIGH   | MEDIUM     |
| LOW    | HIGH   | LOW    | MEDIUM     |
| LOW    | HIGH   | MEDIUM | MEDIUM     |
| LOW    | HIGH   | HIGH   | LOW        |
| MEDIUM | LOW    | LOW    | HIGH       |
| MEDIUM | LOW    | MEDIUM | HIGH       |
| MEDIUM | LOW    | HIGH   | HIGH       |
| MEDIUM | MEDIUM | LOW    | MEDIUM     |
| MEDIUM | MEDIUM | MEDIUM | MEDIUM     |
| MEDIUM | MEDIUM | HIGH   | MEDIUM     |
| MEDIUM | HIGH   | LOW    | MEDIUM     |
| MEDIUM | HIGH   | MEDIUM | LOW        |
| MEDIUM | HIGH   | HIGH   | LOW        |
| HIGH   | LOW    | LOW    | HIGH       |
| HIGH   | LOW    | MEDIUM | HIGH       |
| HIGH   | LOW    | HIGH   | HIGH       |
| HIGH   | MEDIUM | LOW    | MEDIUM     |
| HIGH   | MEDIUM | MEDIUM | MEDIUM     |
| HIGH   | MEDIUM | HIGH   | MEDIUM     |
| HIGH   | HIGH   | LOW    | LOW        |
| HIGH   | HIGH   | MEDIUM | LOW        |
| HIGH   | HIGH   | HIGH   | LOW        |



Таблиця 7.5. Набір правил FIS “Ризик”

|            |        | SEVERITY |        |        |
|------------|--------|----------|--------|--------|
|            |        | LOW      | MEDIUM | HIGH   |
| LIKELIHOOD | LOW    | LOW      | LOW    | MEDIUM |
|            | MEDIUM | LOW      | MEDIUM | HIGH   |
|            | HIGH   | MEDIUM   | HIGH   | HIGH   |

На рис. 7.19 відображені криві оцінки імовірності та ризику контакту ситуації перетину курсів двох суден для різних дистанцій найкоротшого зближення (0.25, 0.5, 1 та 2 милі). Швидкість свого судна – 16 вузлів, швидкість цілі – 10 вузлів. Як видно з графіків при CPA 1 та 2 милі ризик та імовірність майже не залежать від часу. З іншого боку на малих значеннях CPA статус цілі починає змінюватися відповідно до заданих безпечних порогів TCPA та DTCP.

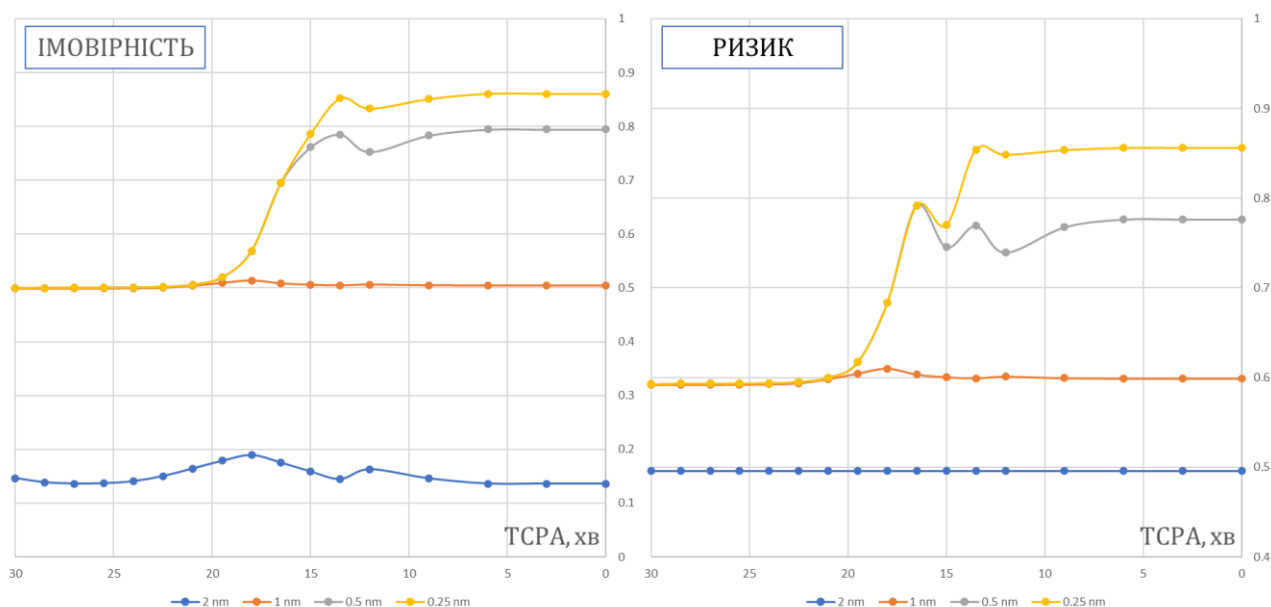


Рис. 7.19. Оцінка FIS ситуації перетину курсів.  $U_S = 16$  вузлів;  $U_T = 10$  вузлів;  
Параметри безпеки: TCPA – 12 хв; CPA – 0.5 мм; DTCP – 1 мм;  $U = 5$  вузлів.

На рис. 7.20 показано приклад відображення цілей на екрані радару у відповідності до їх рівня ризику.

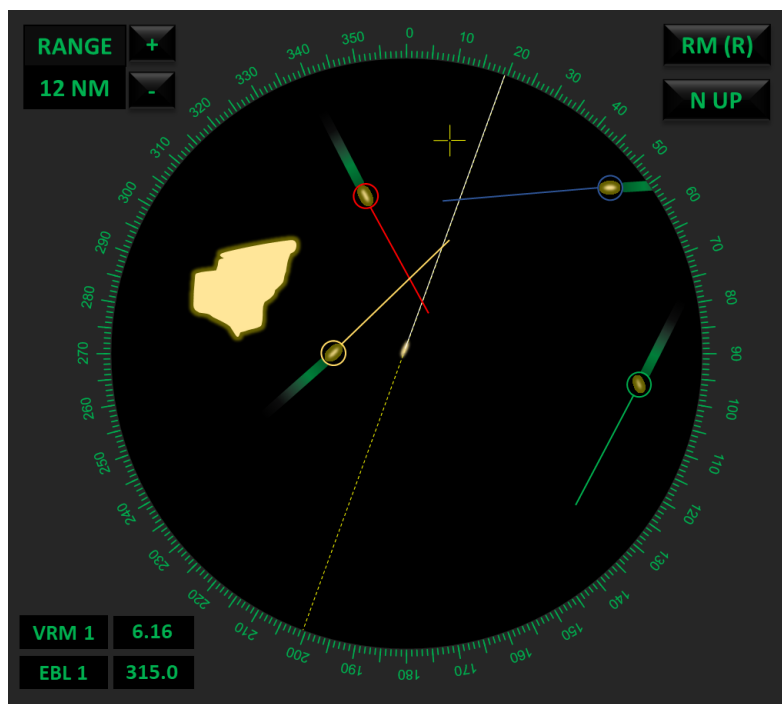


Рис. 7.20. Приклад відображення цілей, які мають різні рівні ризику відносно свого судна

### Висновки за розділом 7

У розділі сформульовано методи оцінки навігаційної безпеки на основі комбінації кількісних та якісних характеристик ризику навігаційного інциденту.

У якості загального визначення навігаційної небезпеки запропоновано використання терміну *контакт* (подія контакту судна з іншим об'єктом).

Ризик контакту у загальному випадку характеризується відношенням швидкості наближення до об'єкту до часу, який залишається до контакту - чим більша швидкість, тим більший потенціальний збиток від контакту, чим менше часу, тим більша його імовірність. З точки зору конструкції судна (найміцніша у носовій частині, та найслабкіша з борту), рівень наслідків також визначає кут під яким відбудеться контакт.

Аналіз імовірності контакту довів до висновків, що крім часу до потенційного контакту на його імовірність також впливають дистанція найкоротшого зближення та дистанція до точки у якій відбудеться контакт. У розділі запропоновано принципи отримання критеріїв таких, як мінімально-

безпечний час до контакту, дистанція найкоротшого зближення та дистанція до точки контакту у залежності від інерційно-маневрових характеристик судна.

Критерій рівня тяжкості наслідків визначається на основі енергетичного підходу – кінематична енергія зіткнення співвідноситься до енергії, якої у разі зіткнення достатньо, щоб пробити подвійний борт судна.

Розроблено алгоритми нормалізації даних та формування функцій приналежності на основі експертного аналізу для системи нечітко-логічного висновку.

Запропоновано структуру системи нечітко-логічного висновку, яка складається із двох послідовних модулів: оцінка імовірності та оцінка ризику.

Запропонований метод дозволяє оцінити ризик ситуації контакту (вчасності зіткнення чи посадки на міліну) залежно від інерційних характеристик судна та інформації про кінематичні взаємозв'язки з іншими об'єктами навігаційного середовища.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих, методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач. За результатами дослідження зроблені наступні основні висновки.

1. Проведено аналіз наукових досліджень та проблем морського транспорту направлений на висвітлення основних факторів які впливають на безпеку судноплавства в умовах новітніх концепцій та стратегії розвитку судноплавної галузі.

2. На прикладі організації та планування операцій судна визначені, засновані на запиті практики, основні проблеми і задачі гарантування безпеки та підвищення ефективності роботи морського транспорту.

3. Доведено, що подальший розвиток ефективного, з позицій комерційної експлуатації, функціонування морських і річкових суден, пов'язаний з гарантуванням безпеки мореплавства, яка досяжна тільки впровадженням інтегрованих методів її кількісного оцінювання.

4. Показано, що існуючі способи оцінки ризику слабо обґрунтовані і неефективні у режимі операційної підтримки рішень. Встановлено, що вдосконалення існуючих способів оцінки безпеки можливо за рахунок впровадження кількісної оцінки ризиків на основі операційної інформації, що надходить від вимірювальної системи судна, автоматичної ідентифікаційної системи інших суден і зовнішніх систем управління рухом.

5. На основі аналізу аварійності морського транспорту та моделювання інцидентів на симуляторах навігаційного містку під час тренування судноводіїв запропоновано класифікацію помилок судноводіїв за результатами небезпечних наближень, зіткнень та посадок суден на міліну, яка відрізняється розробленою

структуризацією помилок, що дозволяє проводити декомпозицію причин морських інцидентів.

6. Визначені основні методологічні основи і принципи аналізу та синтезу процедур і процесів управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач (теоретичні засади, головні принципи і методи), визначена "технологія" наукового дослідження.

7. Встановлено, що для отримання адекватної моделі руху судна для використання у бортовій системі підтримки рішень необхідно уточнювати існуючу модель на основі малої вибірки даних та запропоновано методику верифікації математичної моделі плаского руху судна, яка за рахунок форми запису цільових функцій, дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

8. Вдосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок вільного падіння та інших подібних об'єктів для використання на симуляторах.

9. Запропоновано використання двоканальної системи стабілізації курсу судна, побудованої на основі штучних нейронних мереж. Встановлено, що запропонована система ефективно компенсує дію вітро-хвильових збурень та зменшує витрати пального у режимах стабілізації курсу. Досліджені процеси управління маневруванням судна на основі систем автоматичного про-ходження вздовж траєкторії. Проведено порівняння ефективності запропонованих алгоритмів для різних експлуатаційних умов плавання.

10. На прикладі взаємодії буксир-судно отримано 6 DoF математичну модель взаємодії системи суден пов'язаної гнучким тросом, яка відрізняється урахуванням остійності та плавучості суден, натягу тросу, функціонування гвинтульових колонок, що дозволяє створювати симулятори роботи суден з буксирами та оцінювати можливість втрати керованості і остійності буксиру у різних експлуатаційних умовах.

11. На прикладі судна сейсмічної розвідки з буксированою системою плавучих кабелів великої довжини отримано модель системи судно – несамохідний буксирований об'єкт на гнучкому зв'язку, що дозволяє проводити симуляцію проходження небезпечних ділянок, з урахуванням зовнішніх факторів.

12. На прикладі ситуації розходження судна-цілі з кінцевим буєм сейсмічного кабелю, запропоновано метод зворотного розрахунку розходження суден з урахуванням дрейфу буксированого об'єкту на гнучкому зв'язку.

13. Запропоновано метод визначення небезпечного зближення суден та маневру останнього моменту, залежно від маневрених характеристик судна та куту перетину курсів, у якому визначення потенціального контакту суден виконується віддаленням цілі від розрахункової точки зіткнення, що дозволяє зменшити кількість можливих небезпечних ситуацій, та у значній мірі уточнити і спростити розрахунки.

14. Запропоновано категоризацію зон навігаційного ризику та мінімального за-пасу під кілем, з урахуванням точності картографічної інформації; вдосконалено метод розрахунку безпечної глибини та визначення лімітуючих параметрів при плануванні навігаційного переходу судна, який відрізняється урахуванням комплексу параметрів безпеки.

15. Сформульовано критерій оцінювання найкоротшої дистанції розходження суден, з урахуванням параметрів судна та куту перетину курсів, що дозволяє аргументовано оцінювати небезпеку зіткнення суден.

16. На основі отриманих критеріїв оцінки безпеки судна розроблено методику кількісної оцінки ризику навігаційного інциденту з різнорідними вхідними даними, засновану на концепції формальної оцінки безпеки та нечіткій логіці.

17. Експериментально, та за допомогою методів математичного моделювання, підтверджено, що отримані у дисертації основні наукові результати можуть використатися при розробці алгоритмів та моделей, які є частиною судових систем підтримки прийняття рішень та навігаційних

симуляторів при навчанні, перепідготовці і підвищенні кваліфікації судноводіїв, та осіб, які відповідають за планування роботи флоту, під час розробки проектів експлуатації суден, портів, плануванні рейсу судна та моніторингу безпечного виконання процесів судноводіння.

Основні практичні результати дослідження впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес ЗВО, а також пройшли апробацію на наукових за-ходах міжнародного і державного рівня.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations. IACS Rec. 2012. No. 127. 8 p.
2. ABS Guidance Notes on the Investigation of Marine Incidents. 2005. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/142\\_investigationofmarineincidents/ii\\_rca\\_guidance\\_e-feb14.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/142_investigationofmarineincidents/ii_rca_guidance_e-feb14.pdf)
3. ABS Guide for Risk Evaluations for the Classification of Marine-Related Facilities. 2003. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/117\\_riskevalforclassofmarinerelatedfacilities/pub117\\_riskeval.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/117_riskevalforclassofmarinerelatedfacilities/pub117_riskeval.pdf)
4. ABS Guide for Vessel Maneuverability, 2006. 111 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/conventional\\_ocean\\_service/145\\_vesselmaneuverability/Vessel\\_Maneuverability\\_Guide\\_e-Feb17.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/conventional_ocean_service/145_vesselmaneuverability/Vessel_Maneuverability_Guide_e-Feb17.pdf)
5. Admiralty Guide to the Practical Use of ENCs (NP231). 3rd Edition. 2019.
6. Allianz Global Corporate & Specialty. Safety and Shipping Review 2013. URL: <http://www.agcs.allianz.com/>
7. Allianz Global Corporate & Specialty. Safety and Shipping Review 2016. URL: <http://www.agcs.allianz.com/>
8. An M., Wang J., Ruxton T. The development of fuzzy linguistic risk level for analysis of offshore engineering products using approximate reasoning approach. Proceedings of OMAE 2000, the 19th International Conference of offshore mechanics and Arctic Engineering. New Orleans, USA, 2000. P. 321–329.
9. An M., Wright I. C. What can Design Education do for Industry. Proceedings of the 23rd SEED Annual Conference on Product Design Education. Derby, UK, 2001.
10. Analysis of Station Keeping Incident Data 1994-2003. IMCA M 181. IMCA, 2006. 53 p.
11. Annett J., Stanton N. A. Special issue on task analysis. *Ergonomics*. 1998. Vol. 41, No 11. P. 1529–1536.



12. Artyszuk J. Steady-state maneuvering of a generic ASD tug in escort pull and bow-rope aided push operation. *Proceedings of TransNav*. 2014. Vol. 8, No 3.
13. Astrom K. J., Wittenmark B. Computer Controlled Systems: Theory and Design. 1984. 480 p.
14. Asuelimen G., Blanco-Davis E., Wang J. et al. Formal Safety Assessment of a Marine Seismic Survey Vessel Operation, Incorporating Risk Matrix and Fault Tree Analysis. *Journal of Marine Science and Application*. 2020. Vol. 19. P. 155–172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00136-4>
15. Australian Shipping Occurrence Statistics 2005 to 2012. URL: <https://www.atsb.gov.au/>
16. Aven T. Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 253. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
17. Aven T., Porn K. Expressing and interpreting the results of quantitative risk analysis: Review and discussion. *Reliability Engineering and System Safety*. 1998. Vol. 61. P. 3–10.
18. Ball P. W. The guide to reducing human error in process operations. Human Factors in Reliability Group, SRDA – R3, HMSO: London, 1991.
19. Bandermer H., Gottwald S. Fuzzy sets, Fuzzy logic and Fuzzy methods with applications. New York: John Wiley & Sons, 1995.
20. Barrass C. Ship squat in open water and in confined channels. *Ship Design and Performance for Masters and Mates*. 2004. P. 148–163. DOI: 10.1016/b978-075066000-6/50019-2
21. Barrass C. B. Ship Squat and Interaction. UK, Livingston: Withersby Publishing & Seamanship, 2009. 182 p.
22. Bazovesky I. Reliability theory and practice. New Jersey, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, 1961.
23. Becker-Heins R. Voyage Planning with ECDIS. Practical Guide for Navigators. Geomares Publishing, 2017.

24. Bijlsma S. J. A computational method in ship routing using the concept of limited maneuverability. *The Journal of Navigation*. 2004. Vol. 57, No 3. P. 357–370. DOI: 10.1017/S0373463304002899
25. Bird Frank E., Germain George L. Loss Control Management: Practical Loss Control Leadership. Revised Edition. Det Norske Veritas (U.S.A.), 1996.
26. Blanke M., Staroswiecki M., Wu N. E. Concepts and Methods in Fault-tolerant Control. Invited tutorial lecture at American Control Conference. Washington, USA, 22-24 June 2001. 15 p.
27. Blendermann W. Parameter identification of wind loads on ships. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1994. Vol. 51. P. 339–351.
28. Borg B. Predictive safety from near miss and hazard reporting. Signal Safety and Training, 2002. 18 p.
29. Bowditch N. The American Practical Navigator. Bicentennial Edition. National Imaginary and Mapping Agency, USA, 2002. 877 p.
30. Bradner P., Renilson, M. Interaction Between Two Closely Spaced Azimuthing Thrusters. *Journal of Ship Research*. 1998. Vol. 42, No. 1.
31. Brandner, P. A. Performance and effectiveness of omni-directional stern drive tugs: PhD thesis. Tasmania, November 1995.
32. Bridge watchkeeping and collision avoidance. *Loss prevention bulletin*. Japan P&I club, 2015. Vol. 34. 10 p.
33. Briggs M., Vantorre M., Uliczka K., Debaillon P. Prediction of Squat for Underkeel Clearance. 2010. DOI: 10.1142/9789812819307\_0026.
34. Buckens K. Ship dynamics and rolling. *Seaways: The International Journal of the NI*. Apr 2005. P. 13–14.
35. Burenkov O., Pipchenko O. Monitoring and identification of errors during training on ECDIS simulators. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol. 1, No 43. P. 46–50.

36. Cao Y., Zhou Z., Vorus W. S. Application of a Neural Network Predictor/Controller to Dynamic Positioning of Offshore Structures. *Dynamic Positioning Conference*. New Orleans, LA, USA, 2000. 26 p.
37. Chipperfield A. J., Fleming P. J., Fonseca C. M. Genetic algorithm tools for control systems engineering. Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, 1994. 6 p.
38. Clark I. Ship dynamic for mariners. Nautical Institute. 2005. 293p.
39. Clark I. Stability: The Parametric Effect of Waves on a Ship's Stability. *Seaways: The International Journal of the NI*. 2008. P. 27–30.
40. Code on Intact Stability. For all types of ships covered by IMO instruments. Resolution MSC.267(85). IMO, 2008. 85 p.
41. COLREGS – International Regulations for Preventing Collisions at Sea. Consolidated Edition. IMO, 2003.
42. ConocoPhillips Marine: Safety Pyramid based on a study. April 2003.
43. Coolen, F. P. On Bayesian reliability analysis with informative priors and censoring. *Reliability engineering and System safety*. 1996. Vol. 53 (1). P. 91–98.
44. Cross N. Engineering design methods. New York, Wiley, 1989.
45. Cummins W. E. The Impulse Response Function and Ship Motions. Technical Report 1661. David Taylor Model Basin. Hydromechanics Laboratory, USA, 1962. 12 p.
46. Dang J., Laheij H. Hydrodynamic Aspects of Steerable Thrusters. *Dynamic Positioning Conference*. 2004.
47. De Ridder E. J., Vermeulen K. J., Keuning J. A. A Mathematical Model for the Tacking Maneuver of a Sailing Yacht. The International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, 2004. 34 p.
48. Dolinskaya I. S., Kotinis M., Parsons M. G., Smith R. L. Optimal Short-Range Routing of Vessels in a Seaway. Technical Report 08-03. 2008. 11 p.

49. Dubois D., Prade, H. Basic issues on fuzzy rules and their application to fuzzy control. Proceeding of the IJCAI '91 Workshops on Fuzzy Logic and Fuzzy Control. Sydney, Australia, 1991.
50. Dullens F. P. M. Modeling and Control of a Controllable Pitch Propeller: Master's thesis / Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Group, Technische Universiteit Eindhoven. Netherlands, 2009.
51. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2006 (DPSI 17). IMCA M 192. IMCA, 2008. 76 p.
52. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2007 (DPSI 18). IMCA M 198. IMCA, 2009. 82 p.
53. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2008 (DPSI 19). IMCA M 207. IMCA, 2010. 115 p.
54. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2009 (DPSI 20). IMCA M 211. IMCA, 2011. 86 p.
55. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2010 (DPSI 21). IMCA M 218. IMCA, 2012. 68 p.
56. ECDIS Procedures Guide 2018 Edition. Witherby Publishing Group Ltd, 2018.
57. EMSA Annual overview of marine casualties and incidents 2015. URL: <http://www.emsa.europa.eu> (Last accessed: 10.04.2016).
58. EMSA Annual overview of marine casualties and incidents 2016. URL: <http://www.emsa.europa.eu> (Last accessed: 05.06.2017).
59. EMSA Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019. URL: <http://emsa.europa.eu/emsa-documents/latest/item/3734-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2019.html> (Last accessed: 20.05.2020).
60. Environment Canada, official web site. URL: <http://www.weatheroffice.gc.ca>
61. Ericson C. A. Hazard Analysis Techniques for System Safety. New York, John Wiley & Sons Ltd, 2005. 640 p.
62. Explanatory Notes to the Standards for Ship Maneuverability. IMO MSC/Circ 1053. 2002. 41 p.

63. Faltinsen O. M. Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway. 13th ONR Symp., 1980. P. 505–529
64. Fossen T. Breivik M., Skjetne R. Line-of-sight path following of underactuated marine craft. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36. P. 211–216.
65. Fossen T. High Performance Ship Autopilot with Wave Filter. Proceedings of the 10th International Ship Control Systems Symposium, 1995.
66. Fossen T. I. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. Norwegian University of Science and Technology, 2005. 28 p.
67. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. *Marine Cybernetics*. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
68. Fossen T. I., Smogeli O. Nonlinear Time-Domain Strip Theory Formulation for Low-Speed Maneuvering and Station-Keeping. *Modeling. Identification and Control*. 2004. Vol. 25, No 4. P. 201–221. DOI: 10.4173/mic.2004.4.1
69. Fossen T., Perez T., Smogeli Ø., Sørensen A. NTNU-MSS, Marine Systems Simulator. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009. URL: <http://www.marinecontrol.org/>
70. Freire P. E. M., Bucknall R. Technical and economic feasibility of an unmanned cargo ship powered by electrical propulsion. University College, London, 2003. 15 p.
71. Fukui Y., Yoshimura Y., Yano H., Kondo M. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4-DOF mathematical model. Proceedings of MARSIM 2015. 2015.
72. Gale H., Patraiko D. Improving Navigational Safety. *Seaways: The International Journal of the NI*. July 2007. P. 4–8.
73. Garrick B. J., Christie R. F. Probabilistic risk assessment practices in USA for nuclear power plants. *Safety Science*. 2002. Vol. 40, No 1. P. 177–201.

74. Geller E. Scott. Behavior-based safety: a solution to injury prevention: behavior-based safety 'empowers' employees and addresses the dynamics of injury prevention. *Risk & Insurance*. 2004.
75. Gertman, D. I., Blackman, H. S. Human Reliability and Safety Analysis Data Handbook. New York: Wiley & Sons, 1994. 472 p.
76. Giddings I. Learning the Lessons, Reporting the Incidents. Proc. Dynamic Positioning Conference, October 9-10, 2012.
77. Gierusz W. Modelling the Dynamics of Ships with Different Propulsion Systems for Control Purpose. *Polish Maritime Research*. 2016. Vol. 23. P. 31–36. DOI: 10.1515/pomr-2016-0005.
78. Golding B. K. Industrial Systems for Guidance and Control of Marine Surface Vessels. NNTU, 2004. 111 p.
79. Grosenbaugh M. A. Transient behavior of towed cable systems during ship turning maneuvers. *Ocean Engineering*. 2007. Vol. 34. P. 1532–1542. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2007.01.002
80. Guerin F., Duman B., Usureau E. Reliability estimation by Bayesian method: Definition of prior distribution using dependability study. *Reliability Engineering and System Safety*. 2003. Vol. 82. P. 299–306.
81. Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs). IMCA M 166. April 2002.
82. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. MSC.645. IMO, 1994. 17 p.
83. Heinrich W. H. Industrial Accident Prevention (Ed. 4). New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959.
84. Hensen H. Tug Use in Port: A Practical Guide (Ed. 2). The Nautical Institute, 2003. 192 p.
85. Hollnagel E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method. London: Elsevier Applied Science, 1998.

86. Holtrop J., Mennen G. An Approximate Power Prediction Method. *International Shipbuilding Progress*. 1982. Vol. 29, No 335. P. 166–170.
87. Human Factors in Reliability Group. Improving Compliance with Safety Procedures. Reducing Industrial Violations. London: HSE Books, 1995.
88. Humphreys P. Human Reliability Assessor's Guide: A report by the Human Factors in Reliability Group. Cheshire, 1995. 262 p.
89. IACS. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations. 2012
90. IChemE. IChemE Loss Prevention Bulletin, No. 165. 2002. 24 p.
91. IHO S-67: Mariners' guide to accuracy of electronic navigational charts (ENC). (Ed. 0.5). 2017. URL: <https://iho.int/uploads/user/Services%20and%20Standards/DQWG/Letters/S-67%20Mariners%20guide%20to%20accuracy%20of%20ENC%20v0.5.pdf>
92. Ikeda Y., Himeno, Y., Tanaka, N. A Prediction Method for Ship Rolling. Technical Report 00405. Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, Japan, 1978.
93. IMCA. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2009 (DPSI 20). IMCA M 211. 2011.
94. IMCA. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2010 (DPSI 21). IMCA M 218. 2012.
95. IMCA. Power Management System Study. IMCA M 154. 2000.
96. IMO MSC 192/79. Resolution MSC.192 (79), Revised recommendation on performance standards for radar equipment. 2004.
97. IMO MSC 76/23. Resolution MSC.137 (76), Standards for Ship Manoeuvrability. Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, 2002.
98. IMO MSC circ. 1503 ECDIS – Guidance for Good Practice. 2017.
99. IMO MSC Resolution 36(63) Annex 4 – Procedures for Failure Mode and Effects Analysis (HSC Code).

100. IMO MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in IMO Rule-Making Process. 2018.
101. IMO resolution A. 893 (21) Guidelines for Voyage Planning. 1999.
102. IMO resolution MSC 232 (82) Adoption of the Revised Performance Standards for Electronic Chart Display and Information Systems. 2006.
103. IMO. MSC 1/Circ 1228. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. 2007. 8 p.
104. International Safety Management Code. IMO, 2020.
105. INTERTANKO. Guide to Safe Navigation (Including ECDIS). 2017. 36 p.
106. Ioannou P., Sun J. Robust Adaptive Control. Prentice Hall, 1996. 834 p.
107. Isherwood R. M. Wind resistance of merchant ships. *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*. 1973. Vol. 115. P. 327–338.
108. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. 2018.
109. Japan Transport Safety Board. URL: <http://www.mlit.go.jp/jtsb/marrep.html>
110. Johansen V. Modeling of flexible slender systems for real-time simulation and control applications. NTNU, 2007
111. Johnson L., Johnson N. E. A Knowledge Elicitation Method for Expert Systems Design. *Systems Research and Information Science*. 1987. Vol.2. P. 153–166.
112. Journée J. M. J. Verification and Validation of ship motions program SEAWAY. 2001. URL: <http://www.shipmotions.nl/>
113. Journée J. M. J., Adegeest L. J. M. Theoretical Manual of Strip Theory Program “SEAWAY for Windows”. Report 1370. TU Delft/AMARCON, 2003. 336 p.
114. Journée J. M. J., Massie W. W. Offshore Hydromechanics. Delft University of Technology, 2001. 570 p.
115. Journée J. M. J., Meijijers J. H. C. Ship Routing for Optimum Performance. IME Transactions, Conference on Operation of ships in Rough Weather, 1980. P. 1–17.
116. Journée J. M. J., van Leeuwen G. Prediction of Ship Maneuverability Making Use of Model Tests. Delft University of Technology, 2001. 65 p.



117. Karney C. F. F. Algorithms for geodesics. *Journal of Geodesy*. January 2013. Vol. 87, No 1. P. 43–55. DOI: 10.1007/s00190-012-0578-z
118. Kijima K. Tanaka S. Furukawa Y., Hori T. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics. *Proc. of MARSIM-93*. 1193. Vol. 1. P. 285–294.
119. Kirwan B. A Guide to Practical Human Reliability Assessment. London: Taylor & Francis. 1994. 606 p.
120. Kirwan B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part III – Results and validation exercise. *Applied Ergonomics*. 1997. Vol. 28 No 1. P. 27–39.
121. Kirwan B. Human error identification in human reliability assessment. Part I: Overview of approaches. *Applied Ergonomics*. 1992. Vol. 23 No 5. P. 299–318.
122. Kirwan B., Ainsworth, L. K. A Guide to Task Analysis. London: Taylor & Francis, 1992. 417 p.
123. Kirwan B., Kennedy R., Taylor-Adams S., Lambert, B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part II – Practical aspects of the usage of the techniques. *Applied Ergonomics*. 1997. Vol. 28 No 1. P. 17–25.
124. Klir G. J., Yuan B (Eds.). Fuzzy sets, Fuzzy logic and Fuzzy systems: selected papers by Lotfi Zadeh. World Scientific Publishing Ltd, 1996.
125. Kobylinski L. Problems of handling ships equipped with AZIPOD propulsion systems. *Prace naukowe politechniki warszawskiej*. 2013. Vol. 95. P. 231–245.
126. Kontovas C., Psaraftis H. Formal Safety Assessment: A Critical Review. *Marine Technology*. 2009. Vol. 46. P. 45–59. DOI:10.5957/mtsn.2009.46.1.45.
127. Kosmowski K. T., Kwiesielewicz M. A methodology for incorporating human factors in risk analysis of the industrial system. Proceedings of the ESREL, 2000, SARS and SRA – Europe Annual Conference, Edinburgh, UK. 2000.
128. Krause T. R. The Behavior-Based Safety Process: Managing Involvement for an Injury-Free Culture (2nd Edition). Wiley, 1996. 368 p.

129. Kristiansen E., Egeland O. Frequency-dependent Added Mass in Models for Controller Design For Wave Motion Damping. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2003. 6 p.
130. Kristić M., Žuškin Sr., Brčić D., Valcic S. Zone of Confidence Impact on Cross Track Limit Determination in ECDIS Passage Planning. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. 566 p. DOI: 10.3390/jmse8080566.
131. Lataire E., Vantorre M., Delefortrie G. The Influence of the Ship's Speed and Distance to an Arbitrarily Shaped Bank on Bank Effects. 2015. Vol. 11: Prof. Robert F. Beck Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics. DOI: 10.1115/omae2015-41835
132. Lee G. WU, Parker C. J. Managing collision avoidance at sea. A practical guide. London, England: Nautical Institute, 2007. 181 p.
133. Lee H. Y., Shin S. S. The Prediction of ship's maneuvering performance in initial design stage. *Practical Design of Ships and Mobile Units*. Elsevier Science, 1998. 7 p.
134. Legieć W. Position Cross-Checking on ECDIS in View of International Regulations Requirements and OCIMF Recommendations. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 105–113. DOI:10.12716/1001.10.01.12
135. López E., Velasco F. J., Moyano E., Rueda T. M. Full-Scale Maneuvering Trials Simulation. *Journal of Maritime Research*. 2004. Vol. 1, No 3. P. 37–50.
136. Lusic Z., Bakota M., Mikelic Z. Human errors in ECDIS related accidents. Proceedings of the 7th International Maritime Science Conference, Solin, Croatia, 2017. P. 230–242. URL: [https://bib.irb.hr/datoteka/872610.imsc\\_2017\\_ECDIS.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/872610.imsc_2017_ECDIS.pdf)
137. MAERSK SIRAC – Sea Trial results. Hyundai Heavy Industries. 2015. 15 p.
138. MAIB Marine Accident Investigation branch – “ECDIS assisted accident” URL: <https://www.gov.uk/government/organisations/marine-accident-investigation-branch> (Last accessed: 20.05.2020)

139. MAISSPB Report of Investigation into the Collision between China Registered Bulk Carrier Yao Hai and Ukraine Registered Supply Tug Neftegaz-67 in position 22° 20.7'N, 114° 00.1'E at 2113 on 22 March 2008. URL: <https://madden-maritime.com/wp-content/uploads/2016/09/hk-bulker-and-supply-vessel-collision-oct-2009.pdf>
140. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). URL: <http://www.maib.gov.uk/>
141. Marine Seismic Operations. An overview. IAGC, 2002.
142. Matlab 7.0. Documentation. Electronic version. The MathWorks, Inc., 2020.
143. Matthews Grainne A. Behavioral Safety from the Consumer's Perspective: Determining Who Really Provides Behavior Safety. Cambridge Center for Behavioral Studies, 2013.
144. McTaggart K. A. SHIPMO7: An Updated Strip Theory Program for Predicting Ship Motions and Sea Loads in Waves. Defence Research Establishment Atlantic Dartmouth, 1997. 128 p.
145. Montewka J., Goerlandt F., Lammi H., Kujala P. A method for assessing a causation factor for a geometrical MDTC model for ship-ship collision probability estimation. *Proceedings of TransNav*. 2011. Vol. 5, No 3.
146. Mu D., Wang G., Fan Y., Bai Y., Zhao Y. Fuzzy-Based Optimal Adaptive Line-of-Sight Path Following for Underactuated Unmanned Surface Vehicle with Uncertainties and Time-Varying Disturbances. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. 12 p. DOI: 10.1155/2018/7512606
147. Nielsen M. D. How a ship's bridge knows its position – ECDIS assisted accidents from a contemporary human factors perspective: MSc Thesis. Lund University, Sweden, 2016.
148. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950. Technical and Research Bulletin No. 1-5. 16 p.
149. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the Steering Qualities of Ships. *International Shipbuilding Progress*. 1957. Vol. 4, No 35. P. 354–370.

150. Norwegian Maritime Authority Accident Statistics.  
URL: <https://www.sjofartsdir.no>
151. Nowicki J. Stopping of Ships Equipped with Azipods. *TransNav*. 2014. Vol.8, No 3. DOI: 10.12716/1001.08.03.07
152. OGP. Managing HSE in a geophysical contract. Report №432. 2009.
153. Omerdic E., Roberts G. N., Vukic Z. Reconfigurable Control System for Ship Course-changing/keeping. 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.
154. Oses F., Castells M. Heavy Weather in European Short Sea Shipping: It's Influence on Selected Routes. *The Journal of Navigation*. 2008. Vol. 61, No 1. P. 165–176.
155. Panigrahi J. K., Tripathy J. K., Umesh P. A. Optimum tracking of ship routes in 3g-WAM simulated rough weather using IRS-P4 (MSMR) analyzed wind fields. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2008. Vol. 36. P. 149–158.
156. Papanikolaou, Apostolos, Hamann, Rainer, Eliopoulou, Eleftheria, Golyshev, Pavel. Assessment of Safety Performance of Container Ships. Proceedings of the IDFS 2013. Session 1: PF-2 Shanghai, China, 2013. P. 18–26.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/258997637\\_Assessment\\_of\\_Safety\\_Performance\\_of\\_Container\\_Ships](https://www.researchgate.net/publication/258997637_Assessment_of_Safety_Performance_of_Container_Ships) (Last accessed: 17.02.2021).
157. Perez T. A Review of Geometrical Aspects of Ship Motion in Maneuvering and Seakeeping, and the Use of a Consistent Notation. MSS Technical Report (MSS-TR001-2005). CeSOS, NTNU NO-7491, Trondheim, Norway, 2005. 30 p.
158. Perez T., Blanke M. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report). DTU Technical University of Denmark, 2003. 22 p.
159. PIANC. Harbour Approach Design Guidelines. Report №121. 2014. 320 p.
160. Pipchenko A. D. On the method of calculation of ship's transverse stability in regular waves. *Ships and offshore structures journal*. 2009. Vol. 4, No 1. P. 9–18. DOI: 10.1080/17445300802402579

161. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Development of the Ship Dynamics Model on the Basis of an Artificial Neural Network. *IAMU*. Tokyo. Japan, 2007. Vol. 1, No 5. P. 23–31.
162. Pipchenko O., Shevchenko V. Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions. *Marine Intellectual Technologies - Scientific journal*. 2018. Vol. 4, No 4. P. 208–214.
163. Pipchenko O., Tsymbal M., Shevchenko V. Features of an Ultra-large Container Ship Mathematical Model Adjustment Based on the Results of Sea Trials. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 163–170. DOI: 10.12716/1001.14.01.20,
164. Pipchenko O., Tsymbal M., Shevchenko V. Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12, No 3. P. 567–571. DOI: 10.12716/1001.12.03.17
165. Polydorides, N., Storteig, E., Lionheart, W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35, No 14-15. P. 1429–1438.
166. Priyadarshini D., Muhammad J., Mauerman L. Utilizing Skills to Improve Behavior Based Safety. *PSJ*. 2020. P. 48–52.
167. Prpic-Orsic J., Nabergoj R., Trincas G. The methods of added resistance estimation for ships in a seaway. The 18th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding, 2008. 16 p.
168. Quadvlieg F., Kaul S. Development of a calculation program for escort forces of stern drive tug boats. International Tug & Salvage Convention & Exhibition, Rotterdam, 2006.
169. Report on the investigation of the structural failure of MSC Napoli (English Channel 18/01/2007), № 9/2008. MAIB, 2008. URL: [http://www.maib.gov.uk/publications/investigation\\_reports/2008/msc\\_napoli.cfm](http://www.maib.gov.uk/publications/investigation_reports/2008/msc_napoli.cfm).
170. Review of Maritime Transport. UNCTAD, 2014. 136 p.

171. Review of the Intact Stability Code. IMO. SLF47/INF.5, 2004. 11 p.
172. Richei A., Hauptmann U., Unger H. The human error rate assessment and optimising system HEROS: A new procedure for evaluating and optimising the man-machine interface in PSA. *Reliability Engineering and System Safety*. 2001. Vol. 72, No 2. P. 153–164.
173. Richter R., Burns R., Polkinghorne M., Nurse P. Modeling and Control of Surface Ships by Employing a Fuzzy-Neural Solution. University of Plymouth, Drake Circus, Plymouth, Devon PL4 8AA, UK, 1997. 7 p.
174. Risk focus: loss of power. UK P&I Club, 2012. 12 p.
175. Rutkowski G. ECDIS Limitations, Data Reliability, Alarm Management and Safety Settings Recommended for Passage Planning and Route Monitoring on VLCC Tankers. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12, No. 3. P. 483–490. DOI:10.12716/1001.12.03.06
176. Salvesen N., Tuck E., Faltinsen O. Ship Motions and Sea Loads. *Transactions. Society of Naval Architects and Marine Engineers*. 1970. No 78. P. 250–287.
177. Seabird Exploration LLC. Official Web Site. URL: <http://www.sbexp.com/>
178. Seakeeper. User Manual. Formation Design Systems. 2006. URL: <http://www.formsys.com/maxsurf/msproducts/seakeeper>
179. Semerdjiev E., Mihaylova L. Variable- and Fixed-Structure Augmented Interacting Multiple Model Algorithms for Maneuvering Ship Tracking Based on New Ship Models Bulgarian Academy of Sciences. Central Laboratory for Parallel Processing, 2001. 16 p. URL: <http://www.bas.bg>
180. Serban S., Panaitescu V. Comparison between formulas of maximum ship squat. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2016. No. 19. P. 105–111. DOI: 10.21279/1454-864X-16-I1-018.
181. Shin Y. S., Belenky V. L., Lin W. M., Weems K., Engle A. H. Nonlinear Time Domain Simulation Technology for Seakeeping and Wave-Load Analysis for Modern Ship Design. ABS Technical Papers, 2003. URL: <http://www.eagle.org>

182. Shin Y. S., Belenky V. L., Paulling J. R., Weems K. M., Lin W. M. Criteria for Parametric Roll of Large Containerships in Longitudinal Seas. SNAME, 2004. 24 p.
183. Sii H. S., Ruxton T., Wang J. A Fuzzy-Logic based approach to qualitative safety modeling for Marine system. *Reliability Engineering and System safety*. 2001. Vol. 73, No 1. P. 19–34.
184. Sinha N. K., Gupta M. M. (Eds). Soft computing & intelligent systems theory and application in Fuzzy logic. Academic Press, 2000.
185. SNAME. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. In: Technical and Research Bulletin No. 1-5. 1950. 16 p.
186. Stevens S., Parsons M. Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey. *Marine Technology*. 2002. Vol. 39, No 1. P. 29–47.
187. Straub L. Behavior-based safety. *Water Well Journal*. 2005. Vol. 59. P. 30–32.
188. Suresh P. V., Babar A. K. & Raj V. V. "Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*. 1996. Vol. 83. P. 135–141.
189. Suzuki K., Ohtsubo H., Sajit C. Evaluation of Absorbed Energy in Collision of Ships. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. 1999. P. 311–317. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1999.186\_311.
190. Swift A. J., Bailey T. J. Bridge Team Management. 2nd ed. Nautical Institute, London, UK, 2004. 85 p.
191. Szlapczynska J., Smierzchalski R. Adopted Isochrones Method Improving Ship Safety in Weather Routing with Evolutionary Approach. *International Journal of Reliability and Safety Engineering*. 2007. Vol 14, No 6. P. 635–646.
192. Tasaki R., Takerawa S., Takaishi Y. Collection and analysis of full-scale data. 14 ITTS, Report of seakeeping committee, Ottawa, 1975. P. 237–251.
193. Tello Ruiz M., Delefortrie G., Vantorre M., Geerts S. Propulsion and steering behaviour of a ship equipped with two contra-rotating Z-drives. 10th International conference on hydrodynamics, 2012.

194. Terwisga T. van, Quadvlieg F., Valkhof H. Steerable propulsion units: hydrodynamic issues and design consequences. MARIN, 2001.
195. The Danish Maritime Accident Investigation Board. URL: <http://www.dmaib.com/>
196. The Manouvering Committee. Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, 2005. 62 p.
197. The Mariners' Alerting and Reporting Scheme (MARS). Nautical Institute. URL: <http://www.nautinst.org/en/forums/mars/>
198. The world merchant fleet in 2005-2014. Statistics from Equasis. URL: [www.equasis.org](http://www.equasis.org)
199. Toxopeus S., Loeff G. Manoeuvring Aspects of Fast Ships with Pods. Proceeding of the 3rd International EuroConference on High-Performance Marine Vehicles HIPER'02, Bergen, 14-17 September, 2002. P. 392–406.
200. Transportation Safety Board of Canada. URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/stats/marine/>
201. Tsujimoto M., Shibata K., Kuroda M., Takagi K. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves. Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 2008. Vol. 6. P. 27–30.
202. Turna I., Öztürk O. B. A causative analysis on ECDIS-related grounding accidents, Ships and Offshore Structures. 2019. DOI: 10.1080/17445302.2019.1682919
203. Unar M. A., Murray-Smith D. J. Artificial Neural Networks for Ship Steering Control Systems. Centre for Systems and Control & Department of Electronics and Electrical Engineering University of Glasgow, Glasgow, Scotland, UK, 2003. 4 p.
204. Van Dokkum K., Ten Katen H., Koomen K., Pinkster J. Ship Stability, 5th Edition. Dokmar. 2013. 176 p.
205. Vanem E., Antão P., Castillo Comas, Francisco Del & Skjong R. Formal Safety Assessment of LNG tankers. 10<sup>th</sup> International Symposium on Practical Design



- of Ships and Other Floating Structures, American Bureau of Shipping, USA, 2007. P. 82–90.
206. Vario, J. K. Fault tree analysis of phased mission system with repairable and non-repairable components. *Reliability engineering and System Safety*. 2002. Vol. 74. P. 169–180.
  207. Veksler A., Johansen T., Borrelli F., Realfsen B. Dynamic Positioning With Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016. P. 1–14. DOI: 10.1109/TCST.2015.2497280
  208. Velagica J., Vukicb Z., Omerdicc E. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. P. 433–443.
  209. Verkerk F. Manoeuvring aspects of vessels equipped with pods. Maritime & nautical permanent education. 2002.
  210. Villemeur A. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment. New York, John Wiley & Sons, 1992. 746 p.
  211. Vincenty T. (April 1975a). Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review*. 1975. Vol. 23, No 176. P. 88–93. DOI: 10.1179/sre.1975.23.176.88
  212. Vugts J. H. Pitch and Heave with Fixed and Controlled Bow Fins. *International Shipbuilding Progress (ISP)*. 1967. Vol. 14, No 153. P. 191–215. DOI: 10.3233/ISP-1967-1415302
  213. Wang J., Ruxton T. A Design-for-safety methodology for large engineering systems. *Journal of Engineering design*. 1998. Vol. 9, No 2. P. 159–170.
  214. Wang J., Ruxton T. A Review of safety analysis methods applied to the design of large engineering systems. *Journal of Engineering design*. 1997. Vol. 8, No 2. P. 131–152. DOI: 10.1080/09544829708907957
  215. Wellman G., Melof B., Luketa-Hanlin A., Hightower M., Covan J., Gritz L., Irwin M., Kaneshige M., Morrow C. Guidance on risk analysis and safety implications of a large liquefied natural gas (LNG) spill over water. 2004. DOI: 10.2172/882343.

216. Xiros N. I., Tsourapas V. P., Mourtzouchos K. K. A hydraulic steering gear simulator for analysis and control. Proceeding of WSEAS conference. Athens, Greece, 2004. P. 276–287.
217. Xu K., Tang L. C., Xie M., Ho S. L., Zhu M. L. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability engineering and System safety*. 2002. Vol. 75, No 1. P. 17–29.
218. Yasa A. M., Akyildiz H. A Formal Safety Assessment of Offshore Support Vessels. *GiDB|DERGi*. 2017. P. 34–49.  
URL:[https://www.researchgate.net/publication/323254424\\_A\\_FORMAL\\_SAFE\\_TY\\_ASSESSMENT\\_OF\\_OFFSHORE\\_SUPPORT\\_VESSELS](https://www.researchgate.net/publication/323254424_A_FORMAL_SAFE_TY_ASSESSMENT_OF_OFFSHORE_SUPPORT_VESSELS)
219. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science & Technology*. 2015. Vol. 20. P. 37–52. DOI: 10.1007/s00773-014-0293-y
220. Yoshimura Y., Masumoto Y. Hydrodynamic database and manoeuvring prediction method with medium high-speed merchant ships and fishing vessels. International MARSIM Conference, 2012. P. 494–503.
221. Zadeh L. A. Knowledge representation in Fuzzy logic: An introduction to fuzzy logic application in intelligent systems. Kluwrs Academic Publishers, 1992.
222. Zhang S., Villavicencio R., Pedersen P. (2020). Ship collision damages: Case studies. Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, 2020.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/340279978\\_Ship\\_collision\\_damages\\_Case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/340279978_Ship_collision_damages_Case_studies)
223. Unity User Manual 2020.3 (LTS), 2021 URL:  
<https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>
224. Басин А. М. Ходкость и управляемость судов. М.: Транспорт, 1968. 244 с.
225. Бердинских Б. В. Оперативный контроль мореходности судна с использованием бортовых ЭВМ: дис. ... к.т.н.: 05.08.01 / Николаев: НКИ им. Макарова, 1981. 156 с.

226. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. В 2-х томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1975. 176 с.
227. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 284 с.
228. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов. Л. Судостроение, 1982. 288 с.
229. Вагущенко Л. Л. Метод использования АИС для повышения эффективности действий по предупреждению столкновений судов. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2013. Вып. 22. С. 50–57.
230. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. А. Предотвращение столкновения при чрезмерном сближении. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2017. Вып. 27. С. 53-60. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2017.53–60.
231. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. А. Улучшение поддержки решений по предупреждению столкновений. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2018. Вып. 28. С. 24–34. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.24-34
232. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Изобразительная модель для оценки опасности столкновений. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2009. Вып. 17. С. 17–21.
233. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса: Феникс, 2010. 229 с.
234. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Расчет порождаемых "целью" ограничений на В-маневр собственного судна. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2015. Вып. 25. С. 21–39.
235. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Вдовиченко А. И. Выбор маневра расхождения по областям точек его допустимых инициаций. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2019. Вып. 29. С. 47–54. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.47-54

236. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Заичко С. И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. Одесса: Феникс, 2005. 274 с.
237. Вагущенко Л. Л., Степаненко А. Г. Прогноз движения маневрирующего судна относительно другого судна. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2013. Вып. 23. С. 25–34.
238. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Алексишин А. В. Алгоритм выработки рекомендаций по расхождению с судами. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2012. Вып. 21. С. 51–57.
239. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Изд. 2-е, испр. и доп. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.
240. Виткалов Я. Л. Исследование проблем синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна: автореферат дис. ... к.т.н.: 05.22.19. Владивосток, 2006. 25 с.
241. Волков А. Н., Голиков В. В., Слесаренко А. А. Проблемы безопасности мореплавания и охраны человеческой жизни на море. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2006. Вып. 11. С. 38–41.
242. Воробьев Ю. Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере. СПб.: Судостроение, 1992. 224 с.
243. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ: Астрель, 2006. 991 с.
244. Голиков В. А., Мальцев А. С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2007. Вып. 13. С. 58–74.
245. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.

246. Дорогов А. Ю., Алексеев А. А. Структурные модели быстрых нейронных сетей. «Интеллектуальные системы». Труды II-го Международного симпозиума / ред. К. А. Пупкова. М.: ПАИМС, 1996. Т. 2. С. 138–143.
247. Дорогостайский Д. В. и др. Теория и устройство судна. Л.: Судостроение, 1964. 510 с.
248. Ермаков С. В. Математическая модель маневра последнего момента с пассивным фактором. *Вестник ГУ МРФ*. 2015. №2 (30). С. 41–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-41-48
249. Ершов А. А., Кацман Ф. М. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства. *Транспорт Российской Федерации*. 2006. №5. С. 82–84.
250. Заенцев И. В. Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие. Воронеж: ВГУ, 1999. 76 с.
251. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / ред. Ю. И. Нечаев. СПб: Изд. Центр СПбГМТУ, 2001. 395 с.
252. Козырь Л. А., Аксютин Л. Р. Управление судами в шторм. Изд. 3-е, испр. и доп. Одесса: Феникс, 2006. 218 с.
253. Лукомский Ю. А., Пешехонов В. Г., Скороходов Д. А. Навигация и управление движением судов. Учебник. СПб.: Элмор, 2002. 360 с.
254. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении: Учебное пособие. Одесса: ОМТЦ, 2005. 208 с.
255. Мальцев А. С. Моделирование процесса маневрирования судна векторными дифференциальными уравнениями. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2005. Вып. 9. С. 62–68.
256. Мальцев А. С., Пипченко А. Д., Деревянко А. А. Параметрическая идентификация модели одерживания поворота судна с использованием нейронных сетей. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2007. Вып. 14. С. 63–71.

257. Мальцев А. С. Философские аспекты теории автоматического управления. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2008. Вып. 15. С. 116–123.
258. Мальцев А. С., Вильский Г. Б. Использование информации о рельефе дна для обеспечения навигационной безопасности. *Судовождение*. 2014. Вып. 24. С. 101–109. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sudovozhdenie\\_2014\\_24\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sudovozhdenie_2014_24_15)
259. Мальцев А. С., Орлов Е. О. Некоторые особенности применения AIS для предупреждения столкновений. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2007. Вып. 14. С. 72–79.
260. Мальцев А. С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2006. Вып. 11. С. 74–86.
261. Мальцев А. С., Ивановская А. В. Исследование динамики работы системы неводовыборочный комплекс – промысловое судно. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2012. Вып. 21. С. 138–149.
262. Милетин А. В. Расчет периода качки контейнеровозов. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2014. Вып. 24. С. 116–122
263. Михайлов С. А., Орлов Е. О. Методика расчета параметров сближения судов с использованием информации АИС. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2009. Вып. 17. С. 112–123.
264. Нечаев Ю. И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение. 1989. 240 с.
265. Нечаев Ю. И. Планирование и обработка результатов эксперимента. 2003. URL: [http://skif.pereslavl.ru/~csa/kurs\\_5/index.htm](http://skif.pereslavl.ru/~csa/kurs_5/index.htm)
266. Нечаев Ю. И., Пипченко А. Д., Сизов В. Г. Выбор оптимального курса судна в сложной гидрометеорологической обстановке. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2009. Вып. 16. С. 105–118.
267. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений в условиях неопределенности в задачах безопасности мореплавания. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2006. Вып. 11. С. 91–107.

268. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. Л.: Судостроение, 1983. 272 с.
269. Пипченко А. Д. Оптимизация управления движением судна в штормовых условиях: дис ... к.т.н.: 05.22.16 / ОНМА, Одесса, 2010. 190 с.
270. Пипченко А. Д. Анализ аварийности мирового флота 2005-2015. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2017. Вып. 27. С. 159–168.
271. Пипченко А. Д. Математическое моделирование динамики судна на базе искусственной нейронной сети. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2006. Вып. 12. С. 84–92.
272. Пипченко А. Д. О влиянии килевой и вертикальной качки на остойчивость судна. Матеріали науково-технічної конференції «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння», Одеса, ОНМА, 2008. С. 78–80.
273. Пипченко А. Д. Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна. *Вестник Одесского национального морского университета*. 2017. Вып. 2(51). С. 156–164.
274. Пипченко А. Д. Расчет крена судна на циркуляции. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХГМА, 2017. №1 (16). С. 61–67.
275. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели движения судна. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2005. Вып. 10. С. 97–105.
276. Пипченко А. Д. Формальная оценка безопасности при выполнении задач судна. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2013. Вып. 23. С. 114–121.
277. Пипченко А. Д., Шевченко В. А. К вопросу автоматизированного управления судном на траектории. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2010. Вып. 19. С. 149–155.
278. Пипченко А. Д. Анализ аварийности мирового флота 2005-2015. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2017. Вып. 27. С. 159–168.

279. Пипченко А. Д. Методика выбора оптимального пути судна в шторм. Матеріали науково-технічної конференції «Сучасні проблеми підвищення безпеки судноводіння», Одеса, ОНМА, 2009. С. 85–87.
280. Пипченко А. Д. Моделирование качки судна с учетом колебаний поперечной остойчивости. Международная научно-практическая конференция в честь 80-летнего юбилея В.В. Козлякова / ред. Г. В. Егоров. Одесса: издатель Николай Дубров, 2010. С. 223–228.
281. Пипченко А. Д. Создание упрощенной математической модели движения судна, управляемого рулем и винтом. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2005. Вып. 9. С. 75–81.
282. Пипченко А. Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2017. Вып. 27. С. 1–111.
283. Піпченко О. Д., Перникоза В. В., Казак Ю. В., Бурчак А. І. Моделювання інцидентів при підготовці і перевірці компетентності моряків: ситуація зіткнення буксира «НЕФТЕГАЗ-67» і судна «УАО НАІ». Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація», 14-15.11.2019. С. 72–75.
284. Піпченко, О. Д. (2020) Моніторинг та ідентифікація помилок під час навчання на навігаційних симуляторах. *Суднобудування* Вип. №2 2020, НУК, С. 3–11. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.2\(480\).1](https://doi.org/10.15589/znp2020.2(480).1)
285. Подпорин С. А. Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2011. Вып. 19. С. 156–165.
286. Подпорин С. А. Развитие методов интеллектуального управления движением судна на курсе: дис. ... к.т.н.: 05.22.13 / ОНМА, Одесса, 2009. 180 с.



287. Справочник по теории корабля: в 3 т. / ред. Я. И. Войткунский. Л.: Судостроение, 1985.
288. Стехновский Д. И., Зубков А. Е. Навигационная гидрометеорология. М.: Транспорт, 1977. 264 с.
289. Управление судном. Учеб. для вузов / Демин С. И., Жуков Е. И., Кубачев Н. А. и др. М.: Транспорт, 1991. 359 с
290. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Изд. 2-е, испр. / пер. с англ. Н. Н. Куссуль. М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. 1104 с.

**ДОДАТОК А – РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРТНОГО ОПИТУВАННЯ  
СУДНОВОДІВ**

Таблиця А-1. Оцінка ситуацій перетину та зустрічних курсів

| №  | Ранг                            | Опит, років | TCPA crossing | TCPA head on | CPA Crossing | CPA Head On | Довжина судна, м | Тип судна       |
|----|---------------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
| 1  | Master                          | 30.0        | 12            | 12           | 0.8          | 0.8         |                  |                 |
| 2  | Chief Officer                   | 10.0        | 10            | 20           | 0.2          | 0.2         |                  |                 |
| 3  | Chief officer                   | 8.0         | 12            | 9            | 3            | 0.5         | 150              | Dredger         |
| 4  | 3 rd officer                    | 1.9         | 15            | 15           | 0.4          | 0.4         | 300              | Container       |
| 5  | 2nd officer                     | 4.0         | 12            | 12           | 2            | 1           |                  |                 |
| 6  | Chief Officer                   | 9.0         | 24            | 18           | 1            | 0.5         |                  |                 |
| 7  | SDPO                            | 11.0        | 30            | 30           | 1            | 0.6         |                  |                 |
| 8  | Captain                         | 15.0        | 9             | 6            | 0.8          | 0.5         |                  |                 |
| 9  | Master                          | 17.0        | 12            | 12           | 1            | 1           | 100              | Offshore vessel |
| 10 | Salvage master, project manager | 35.0        | 3             | 12           | 3            | 1           |                  |                 |
| 11 | Chief officer                   | 15.0        | 15            | 20           | 1.5          | 0.8         | 250              | Container       |
| 12 | 3rd Officer                     | 1.2         | 30            | 12           | 1            | 1           | 112              | Oil/Chem Tanker |
| 13 | Chief officer                   | 5.0         | 15            | 20           | 1            | 0.5         | 45               | M/Y             |
| 14 | Chief officer                   | 7.0         | 8             | 18           | 2            | 1           | 229              | Bulker          |
| 15 | 3rd Officer                     | 1.0         | 4             | 8            | 0.8          | 0.3         | 150              | Container       |
| 16 | 3rd Officer                     | 1.4         | 6             | 6            | 1            | 1           | 182              | Tanker          |
| 17 | 3rd Officer                     | 2.0         | 18            | 18           | 1            | 1           | 360              | Container       |
| 18 | 2nd Officer                     | 5.0         | 10            | 10           | 1            | 1.5         | 180              | Container       |
| 19 | Master                          | 13.0        | 30            | 30           | 3            | 1           | 115              | Tanker          |
| 20 | Master                          | 22.0        | 15            | 10           | 0.5          | 0.3         | 300              | Container       |
| 21 | 2nd Officer                     | 15.0        | 12            | 12           | 0.7          | 0.5         | 110              | MPOV            |
| 22 | 2nd Officer                     | 9.0         | 12            | 6            | 1.5          | 1.1         | 316              | Container       |
| 23 | 2nd Officer                     | 6.0         | 10            | 15           | 1            | 1           | 145.26           | Chemical Tanker |
| 24 | 2nd Officer                     | 5.0         | 30            | 30           | 0.2          | 0.1         | 200              | Container       |
| 25 | Chief Officer                   | 10.0        | 15            | 20           | 1            | 1           | 232              | Container       |
| 26 | Chief Officer                   | 5.0         | 12            | 20           | 1.5          | 0.4         | 140              | General cargo   |
| 27 | Master                          | 9.0         | 16            | 12           | 1            | 1           | 216              | Container       |
| 28 | 2nd Officer                     | 3.0         | 15            | 15           | 1            | 1           | 300              | Container       |
| 29 | 2nd Officer                     | 4.0         | 10            | 20           | 1            | 1           | 230              | Bulker          |
| 30 | 2nd Officer                     | 10.0        | 10            | 6            | 1            | 0.5         | 65               | Ahts            |
| 31 | 3rd Officer                     | 10.0        | 20            | 15           | 2            | 1.5         | 190              | Container       |
| 32 | 3rd Officer                     | 2.0         | 0             | 0            | 2            | 1           | 225              | Tanker          |
| 33 | Chief Officer                   | 21.0        | 10            | 6            | 0.2          | 0.1         | 168              | Ro-Ro           |
| 34 | Master                          | 24.0        | 15            | 12           | 2            | 1.5         | 300              | Container       |
| 35 | 2nd Officer                     | 3.0         | 20            | 20           | 1.5          | 1.5         | 330              | Container       |
| 36 | Chief Officer                   | 10.0        | 20            | 15           | 1.8          | 1.8         | 300              | Container       |
| 37 | Chief Officer                   | 30.0        | 20            | 15           | 2            | 1.5         | 300              | Container       |
| 38 | Chief Officer                   | 8.0         | 20            | 20           | 0.7          | 0.7         | 138              | Heavy Lift      |
| 39 | 3rd Officer                     | 1.0         | 24            | 24           | 0.5          | 0.5         | 293              | Container       |
| 40 | 2nd Officer                     | 5.0         | 12            | 20           | 0.9          | 1           | 180              | Oil/chem tanker |
| 41 | 2nd Officer                     | 6.0         | 12            | 18           | 0.8          | 0.5         | 342              | Container       |

продовження таблиці А-1

| №  | Ранг                      | Опит,<br>років | TCPA<br>crossing | TCPA<br>head<br>on | CPA<br>Crossing | CPA<br>Head<br>On | Довжина<br>судна, м | Тип судна                       |
|----|---------------------------|----------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|
| 42 | 3rd Officer               | 6.0            | 15               | 15                 | 1               | 0.4               | 140                 | BULK<br>CARRIERS                |
| 43 | Chief Officer             | 15.0           | 12               | 12                 | 0.7             | 0.7               | 138                 | Mpv                             |
| 44 | 3rd Officer               | 2.0            | 6                | 12                 | 3               | 1                 | 325                 | Bulker                          |
| 45 | 2nd Officer               | 1.0            | 6                | 18                 | 2               | 2                 | 60                  | ERRV                            |
| 46 | 2nd Officer               | 6.0            | 0                | 12                 | 0.5             | 0.8               | 244                 | Crude oil<br>tanker             |
| 47 | Chief Officer             | 18.0           | 12               | 12                 | 2               | 1                 | 217                 | Container                       |
| 48 | Chief Officer             | 8.0            | 6                | 4                  | 1               | 1                 | 140                 | Heavy<br>Lift/General<br>Cargo  |
| 49 | Chief Officer             | 11.0           | 12               | 15                 | 2               | 1.5               | 170                 | LEG                             |
| 50 | Chief Officer             | 6.0            | 10               | 10                 | 0.5             | 0.5               | 60                  | MPSV                            |
| 51 | Chief Officer             | 13.0           | 15               | 15                 | 1               | 1                 | 300                 | Bulk carrier                    |
| 52 | Chief Officer             | 8.0            | 15               | 15                 | 0.5             | 0.5               | 80                  | AHTS                            |
| 53 | Chief Officer             | 14.0           | 5                | 12                 | 0.7             | 0.4               | 90                  | Seismic                         |
| 54 | Chief Officer             | 15.0           | 15               | 15                 | 1.5             | 2                 | 109                 | General cargo                   |
| 55 | Chief Officer             | 15.0           | 15               | 15                 | 1.5             | 2                 | 109                 | General cargo                   |
| 56 | Chief Officer             | 6.0            | 25               | 20                 | 1               | 1                 | 140                 | Reefer                          |
| 57 | Chief Officer             | 6.0            | 6                | 12                 | 2               | 1                 | 300                 | Container                       |
| 58 | Master                    | 40.0           | 20               | 30                 | 1.5             | 2                 | 150                 | Container                       |
| 59 | Chief Officer             | 13.0           | 15               | 15                 | 1               | 0.3               | 98                  | General<br>Cargo                |
| 60 | Master                    | 20.0           | 9                | 18                 | 1               | 1                 | 250                 | Container                       |
| 61 | 2nd Officer               | 7.0            | 10               | 10                 | 0.7             | 0.3               | 282                 | Bulk carrier                    |
| 62 | 3rd Officer               | 1.0            | 20               | 15                 | 1               | 0.5               | 174                 | General cargo                   |
| 63 | 3rd Officer               | 2.0            | 6                | 12                 | 0.5             | 0.5               | 274                 | Oil tanker                      |
| 64 | Master                    | 18.0           | 15               | 15                 | 0.5             | 1                 | 80                  | OSV                             |
| 65 | 3rd Officer               | 1.0            | 5                | 10                 | 1               | 1                 | 280                 | Container                       |
| 66 | Master                    | 17.0           | 15               | 20                 | 1               | 1                 | 200                 | Container                       |
| 67 | 2nd Officer               | 10.0           | 6                | 6                  | 0.5             | 0.5               | 150                 | Container                       |
| 68 | Master                    | 40.0           | 6                | 12                 | 1.5             | 1.5               | 138                 | Multipurpose<br>Heavy Lift      |
| 69 | 3rd Officer               | 2.0            | 8                | 16                 | 1               | 0.7               | 170                 | PCC                             |
| 70 | Chief Officer             | 12.0           | 16               | 16                 | 1.5             | 1                 | 360                 | Container                       |
| 71 | 3rd Officer               | 3.0            | 20               | 20                 | 1.5             | 1                 | 150                 | Bulk, heavy<br>lift , container |
| 72 | 2nd Officer               | 5.0            | 12               | 12                 | 1.5             | 1.5               | 334                 | Container<br>ship               |
| 73 | Master                    | 35.0           | 12               | 12                 | 3               | 3                 | 139.2               | general cargo                   |
| 74 | 2nd Officer               | 14.0           | 12               | 20                 | 1               | 0.5               | 150                 | Heavy load<br>carrier           |
| 75 | 3rd Officer               | 2.0            | 15               | 30                 | 1               | 2                 | 160                 | Lpg/E carrier                   |
| 76 | 2nd Officer               | 2.0            | 20               | 30                 | 1               | 1                 | 115                 | General cargo                   |
| 77 | Junior Officer /<br>Cadet | 0.0            | 12               | 12                 | 3               | 0.7               | 199.9               | Multi Purpose                   |

продовження таблиці А-1

| №   | Ранг                      | Опит,<br>років | ТСРА<br>crossing | ТСРА<br>head<br>on | СРА<br>Crossing | СРА<br>Head<br>On | Довжина<br>судна, м | Тип судна                      |
|-----|---------------------------|----------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|
| 78  | Junior Officer /<br>Cadet | 0.0            | 10               | 10                 | 1               | 0.1               | 290                 | Bulker                         |
| 79  | 2nd Officer               | 4.5            | 30               | 30                 | 2               | 2                 | 333                 | VLCC                           |
| 80  | Chief Officer             | 7.0            | 20               | 20                 | 2               | 1.2               | 100                 | GC. AHTS                       |
| 81  | 3rd Officer               | 3.0            | 20               | 20                 | 1.5             | 3                 | 350                 | Containership<br>vessel        |
| 82  | 3rd Officer               | 3.0            | 6                | 3                  | 0.5             | 0.2               | 200                 | Container                      |
| 83  | 2nd Officer               | 10.0           | 12               | 18                 | 0.3             | 0.5               | 317                 | passenger                      |
| 84  | Chief Officer             | 6.0            | 15               | 15                 | 1               | 0.6               | 14                  | Dry cargo                      |
| 85  | 2nd Officer               | 2.0            | 15               | 15                 | 1.5             | 1                 | 170                 | General<br>Cargo               |
| 86  | 2nd Officer               | 1.0            | 30               | 30                 | 1               | 1                 | 120                 | General cargo                  |
| 87  | 2nd Officer               | 7.0            | 30               | 15                 | 1               | 0.5               | 130                 | General cargo                  |
| 88  | 2nd Officer               | 17.0           | 30               | 30                 | 2               | 2                 | 245                 | SUL Bulk<br>Carrier            |
| 89  | 2nd Officer               | 4.0            | 30               | 30                 | 15              | 0.8               | 190                 | bulk carriers                  |
| 90  | 2nd Officer               | 5.0            | 15               | 30                 | 1               | 1                 | 280                 | Bulk carrier                   |
| 91  | Master                    | 21.0           | 3                | 5                  | 0.5             | 0.3               | 153                 | General cargo                  |
| 92  | Junior Officer /<br>Cadet | 1.0            | 10               | 20                 | 0.5             | 0.6               | 270                 | Container                      |
| 93  | Master                    | 28.0           | 3                | 6                  | 1               | 0.5               | 110                 | Cement<br>Carrier              |
| 94  | Master                    | 32.0           | 10               | 20                 | 1               | 1                 | 300                 | Container                      |
| 95  | 2nd Officer               | 3.0            | 25               | 30                 | 1.5             | 1                 | 182.5               | Tanker                         |
| 96  | 2nd Officer               | 7.0            | 10               | 10                 | 0.6             | 1                 | 200                 | Ro-Ro                          |
| 97  | 3rd Officer               | 1.0            | 15               | 15                 | 1.5             | 0.7               | 130                 | General cargo                  |
| 98  | Other                     | 3.0            | 6                | 6                  | 2               | 1.5               | 173                 | LO-RO                          |
| 99  | Chief Officer             | 15.0           | 20               | 20                 | 1               | 0.5               | 88                  | Ocean<br>Towing AHTS           |
| 100 | 2nd Officer               | 10.0           | 15               | 30                 | 3               | 2                 | 248                 | Oil tanker                     |
| 101 | Other                     | 6.0            | 12               | 10                 | 2               | 2                 | 25                  | pleasure<br>crafts             |
| 102 | Chief Officer             | 16.0           | 15               | 15                 | 2               | 2                 | 183                 | Tanker                         |
| 103 | Chief Officer             | 6.0            | 6                | 12                 | 2               | 1                 | 300                 | Container                      |
| 104 | Chief Officer             | 12.0           | 18               | 15                 | 1               | 0.5               | 114                 | General cargo                  |
| 105 | Chief Officer             | 14.0           | 20               | 30                 | 1               | 0.4               | 87                  | MPSV                           |
| 106 | 2nd Officer               | 5.0            | 3                | 7                  | 0.5             | 0.5               | 120                 | GC, TSHD,<br>Cement<br>Carrier |
| 107 | Chief Officer             | 20.0           | 15               | 15                 | 2               | 2                 | 202                 | container                      |
| 108 | Master                    | 20.0           | 12               | 5                  | 0.4             | 0.4               | 180                 | BULKER,<br>AHTS/PSV            |
| 109 | Master                    | 35.0           | 15               | 15                 | 1               | 1                 | 230                 | Bulker                         |
| 110 | 2nd Officer               | 3.0            | 6                | 10                 | 1               | 0.5               | 180                 | Bulk                           |
| 111 | Chief Officer             | 18.0           | 20               | 20                 | 1               | 1                 | 100                 | Coaster                        |
| 112 | 2nd Officer               | 2.5            | 10               | 15                 | 1               | 1                 | 244                 | Oil Tanker                     |

продовження таблиці А-1

| №   | Ранг                   | Опит, років | ТСРА crossing | ТСРА head on | CPA Crossing | CPA Head On | Довжина судна, м | Тип судна      |
|-----|------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|------------------|----------------|
| 113 | Master                 | 20.0        | 6             | 6            | 1            | 1           | 150              | General cargo  |
| 114 | Chief Officer          | 12.0        | 15            | 15           | 1            | 1           | 140              | General cargo  |
| 115 | Master                 | 14.0        | 12            | 18           | 1            | 0.9         | 200              | Other          |
| 116 | 2nd Officer            | 6.0         | 20            | 20           | 1            | 0.7         | 300              | Bulk           |
| 117 | Master                 | 33.0        | 7             | 10           | 1            | 1           | 200              | Container      |
| 118 | Chief Officer          | 11.0        | 12            | 12           | 2            | 1           | 153              | General cargo  |
| 119 | Chief Officer          | 4.0         | 12            | 10           | 0.5          | 0.3         | 180              | Container      |
| 120 | Master                 | 15.0        | 18            | 18           | 0.5          | 0.5         | 200              | Offshore       |
| 121 | Chief Officer          | 12.0        | 10            | 20           | 0.5          | 0.5         | 184              | HLV            |
| 122 | Chief Officer          | 9.0         | 6             | 12           | 0.5          | 0.5         | 70               | AHTS           |
| 123 | 3rd Officer            | 1.5         | 12            | 18           | 2            | 2           | 252              | Oil tanker     |
| 124 | Master                 | 43.0        | 12            | 12           | 1            | 1           | 219              | Container      |
| 125 | Chief Officer          | 8.0         | 15            | 20           | 1            | 1           | 185              | LPG            |
| 126 | Junior Officer / Cadet | 1.0         | 12            | 12           | 1            | 1           | 220              | Container ship |
| 127 | 2nd Officer            | 2.5         | 15            | 12           | 2.1          | 2           | 187              | Container      |
| 128 | Chief Officer          | 9.0         | 12            | 12           | 1            | 1           | 240              | container      |
| 129 | Chief Officer          | 6.0         | 5             | 12           | 3            | 3           | 220              | oil tanker     |
| 130 | Chief Officer          | 10.0        | 18            | 12           | 1            | 0.5         | 270              | Dredger        |
| 131 | 2nd Officer            | 4.0         | 12            | 20           | 0.5          | 0.5         | 300              | bulk carrier   |
| 132 | 2nd Officer            | 3.0         | 5             | 15           | 1            | 1           | 110              | tanker         |

\* ТСРА – вказується мінімально-безпечне значення у хвиликах; CPA - вказується мінімально-безпечне значення у морських милях.

Таблиця А-2. Оцінка ситуації перетину з кормових курсів

| №  | Ранг          | Опит, років | ТСРА 135 Give Way | ТСРА 135 Stand On | CPA 135 Give Way | CPA 135 Stand On | Довжина судна, м | Тип судна                |
|----|---------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| 42 | 3rd Officer   | 6.0         | 18                | 12                | 1                | 3                | 140              | BULK CARRIERS            |
| 43 | Chief Officer | 15.0        | 6                 | 12                | 2                | 2                | 138              | Mpv                      |
| 44 | 3rd Officer   | 2.0         | 10                | 15                | 1                | 1.5              | 325              | Bulker                   |
| 45 | 2nd Officer   | 1.0         | 12                | 18                | 1                | 2                | 60               | ERRV                     |
| 46 | 2nd Officer   | 6.0         | 20                | 20                | 2                | 1                | 244              | Crude oil tanker         |
| 47 | Chief Officer | 18.0        | 20                | 30                | 5                | 5                | 217              | Container                |
| 48 | Chief Officer | 8.0         | 4                 | 4                 | 1                | 1                | 140              | Heavy Lift/General Cargo |
| 49 | Chief Officer | 11.0        | 12                | 18                | 1.5              | 1.5              | 170              | LEG                      |
| 50 | Chief Officer | 6.0         | 5                 | 15                | 0.5              | 0.5              | 60               | MPSV                     |
| 51 | Chief Officer | 13.0        | 15                | 15                | 1                | 1                | 300              | Bulk carrier             |

продовження таблиці А-2

| №  | Ранг                      | Опит,<br>років | ТСПА<br>135<br>Give<br>Way | ТСПА<br>135<br>Stand<br>On | СРА<br>135<br>Give<br>Way | СРА<br>135<br>Stand<br>On | Довжина<br>судна, м | Тип судна                       |
|----|---------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 52 | Chief Officer             | 8.0            | 15                         | 30                         | 0.5                       | 0.5                       | 80                  | AHTS                            |
| 53 | Chief Officer             | 14.0           | 5                          | 15                         | 1                         | 0.7                       | 90                  | Seismic                         |
| 54 | Chief Officer             | 15.0           | 15                         | 15                         | 20                        | 20                        | 109                 | General cargo                   |
| 55 | Chief Officer             | 15.0           | 15                         | 15                         | 20                        | 20                        | 109                 | General cargo                   |
| 56 | Chief Officer             | 6.0            | 20                         | 25                         | 1                         | 1                         | 140                 | Reefer                          |
| 57 | Chief Officer             | 6.0            | 6                          | 15                         | 2                         | 2                         | 300                 | Container                       |
| 58 | Master                    | 40.0           | 15                         | 30                         | 1.5                       | 1.2                       | 150                 | Container                       |
| 59 | Chief Officer             | 13.0           | 3                          | 3                          | 0.5                       | 0.7                       | 98                  | General Cargo                   |
| 60 | Master                    | 20.0           | 9                          | 9                          | 1                         | 1                         | 250                 | Container                       |
| 61 | 2nd Officer               | 7.0            | 10                         | 12                         | 1                         | 1                         | 282                 | Bulk carrier                    |
| 62 | 3rd Officer               | 1.0            | 15                         | 20                         | 0.8                       | 1                         | 174                 | General cargo                   |
| 63 | 3rd Officer               | 2.0            | 12                         | 30                         | 1.5                       | 1                         | 274                 | Oil tanker                      |
| 64 | Master                    | 18.0           | 15                         | 15                         | 0.5                       | 0.5                       | 80                  | OSV                             |
| 65 | 3rd Officer               | 1.0            | 5                          | 6                          | 1                         | 0.8                       | 280                 | Container                       |
| 66 | Master                    | 17.0           | 15                         | 10                         | 3                         | 3                         | 200                 | Container                       |
| 67 | 2nd Officer               | 10.0           | 6                          | 12                         | 1                         | 1                         | 150                 | Container                       |
| 68 | Master                    | 40.0           | 6                          | 12                         | 1.5                       | 1.5                       | 138                 | Multipurpose<br>Heavy Lift      |
| 69 | 3rd Officer               | 2.0            | 16                         | 25                         | 1                         | 1                         | 170                 | PCC                             |
| 70 | Chief Officer             | 12.0           | 7                          | 20                         | 1                         | 1                         | 360                 | Container                       |
| 71 | 3rd Officer               | 3.0            | 20                         | 20                         | 1.5                       | 1.5                       | 150                 | Bulk, heavy lift<br>, container |
| 72 | 2nd Officer               | 5.0            | 25                         | 25                         | 1.5                       | 3                         | 334                 | Container ship                  |
| 73 | Master                    | 35.0           | 12                         | 12                         | 3                         | 3                         | 139.2               | general cargo                   |
| 74 | 2nd Officer               | 14.0           | 12                         | 20                         | 1                         | 1                         | 150                 | Heavy load<br>carrier           |
| 75 | 3rd Officer               | 2.0            | 30                         | 24                         | 1                         | 1.5                       | 160                 | Lpg/E carrier                   |
| 76 | 2nd Officer               | 2.0            | 20                         | 30                         | 1                         | 1                         | 115                 | General cargo                   |
| 77 | Junior Officer /<br>Cadet | 0.0            | 12                         | 18                         | 2                         | 1                         | 199.9               | Multi Purpose                   |
| 78 | Junior Officer /<br>Cadet | 0.0            | 10                         | 10                         | 0.1                       | 0.1                       | 290                 | Bulker                          |
| 79 | 2nd Officer               | 4.5            | 20                         | 30                         | 3                         | 2                         | 333                 | VLCC                            |
| 80 | Chief Officer             | 7.0            | 15                         | 20                         | 2                         | 1.2                       | 100                 | GC. AHTS                        |
| 81 | 3rd Officer               | 3.0            | 12                         | 20                         | 3                         | 3                         | 350                 | Containership<br>vessel         |
| 82 | 3rd Officer               | 3.0            | 3                          | 5                          | 0.1                       | 0.3                       | 200                 | Container                       |
| 83 | 2nd Officer               | 10.0           | 6                          | 12                         | 0.7                       | 1                         | 317                 | passenger                       |
| 84 | Chief Officer             | 6.0            | 15                         | 15                         | 1                         | 1                         | 14                  | Dry cargo                       |
| 85 | 2nd Officer               | 2.0            | 10                         | 15                         | 1.5                       | 1.5                       | 170                 | General Cargo                   |
| 86 | 2nd Officer               | 1.0            | 30                         | 30                         | 1                         | 1                         | 120                 | General cargo                   |
| 87 | 2nd Officer               | 7.0            | 30                         | 30                         | 1                         | 1                         | 130                 | General cargo                   |
| 88 | 2nd Officer               | 17.0           | 25                         | 45                         | 2                         | 2                         | 245                 | SUL Bulk<br>Carrier             |

продовження таблиці А-2

| №   | Ранг                   | Опит, років | ТСРА 135 Give Way | ТСРА 135 Stand On | СРА 135 Give Way | СРА 135 Stand On | Довжина судна, м | Тип судна                |
|-----|------------------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| 89  | 2nd Officer            | 4.0         | 15                | 30                | 1                | 1                | 190              | bulk carriers            |
| 90  | 2nd Officer            | 5.0         | 60                | 60                | 1                | 1                | 280              | Bulk carrier             |
| 91  | Master                 | 21.0        | 5                 | 5                 | 0.7              | 0.8              | 153              | General cargo            |
| 92  | Junior Officer / Cadet | 1.0         | 10                | 15                | 0.3              | 0.7              | 270              | Container                |
| 93  | Master                 | 28.0        | 9                 | 9                 | 1.5              | 1.5              | 110              | Cement Carrier           |
| 94  | Master                 | 32.0        | 10                | 10                | 0.5              | 0.5              | 300              | Container                |
| 95  | 2nd Officer            | 3.0         | 30                | 1                 | 1                | 1                | 182.5            | Tanker                   |
| 96  | 2nd Officer            | 7.0         | 10                | 10                | 1                | 1                | 200              | Ro-Ro                    |
| 97  | 3rd Officer            | 1.0         | 20                | 20                | 1.5              | 1                | 130              | General cargo            |
| 98  | Other                  | 3.0         | 6                 | 6                 | 3                | 3                | 173              | LO-RO                    |
| 99  | Chief Officer          | 15.0        | 30                | 20                | 1                | 1                | 88               | Ocean Towing AHTS        |
| 100 | 2nd Officer            | 10.0        | 20                | 30                | 3                | 2                | 248              | Oil tanker               |
| 101 | Other                  | 6.0         | 10                | 15                | 2                | 2                | 25               | pleasure crafts          |
| 102 | Chief Officer          | 16.0        | 15                | 15                | 2                | 2                | 183              | Tanker                   |
| 103 | Chief Officer          | 6.0         | 6                 | 15                | 2                | 2                | 300              | Container                |
| 104 | Chief Officer          | 12.0        | 15                | 20                | 1                | 1                | 114              | General cargo            |
| 105 | Chief Officer          | 14.0        | 10                | 30                | 0.5              | 0.5              | 87               | MPSV                     |
| 106 | 2nd Officer            | 5.0         | 6                 | 20                | 0.7              | 0.7              | 120              | GC, TSHD, Cement Carrier |
| 107 | Chief Officer          | 20.0        | 15                | 15                | 2                | 2                | 202              | container                |
| 108 | Master                 | 20.0        | 15                | 25                | 0.8              | 0.4              | 180              | BULKER, AHTS/PSV         |
| 109 | Master                 | 35.0        | 13                | 20                | 1                | 1                | 230              | Bulker                   |
| 110 | 2nd Officer            | 3.0         | 10                | 10                | 0.5              | 0.5              | 180              | Bulk                     |
| 111 | Chief Officer          | 18.0        | 20                | 20                | 1                | 1                | 100              | Coaster                  |
| 112 | 2nd Officer            | 2.5         | 30                | 30                | 2                | 2                | 244              | Oil Tanker               |
| 113 | Master                 | 20.0        | 12                | 12                | 1                | 1                | 150              | General cargo            |
| 114 | Chief Officer          | 12.0        | 10                | 15                | 1                | 1                | 140              | General cargo            |
| 115 | Master                 | 14.0        | 24                | 24                | 21               | 1.5              | 200              | Other                    |
| 116 | 2nd Officer            | 6.0         | 0.8               | 15                | 0.8              | 0.6              | 300              | Bulk                     |
| 117 | Master                 | 33.0        | 5                 | 15                | 1                | 1                | 200              | Container                |
| 118 | Chief Officer          | 11.0        | 30                | 30                | 2                | 2                | 153              | General cargo            |
| 119 | Chief Officer          | 4.0         | 6                 | 6                 | 0.5              | 0.5              | 180              | Container                |
| 120 | Master                 | 15.0        | 18                | 18                | 0.5              | 0.5              | 200              | Offshore                 |
| 121 | Chief Officer          | 12.0        | 30                | 20                | 0.8              | 0.5              | 184              | HLV                      |
| 122 | Chief Officer          | 9.0         | 3                 | 6                 | 0.5              | 0.5              | 70               | AHTS                     |
| 123 | 3rd Officer            | 1.5         | 12                | 24                | 2                | 2                | 252              | Oil tanker               |
| 124 | Master                 | 43.0        | 6                 | 24                | 1                | 1                | 219              | Container                |
| 125 | Chief Officer          | 8.0         | 15                | 20                | 1                | 1                | 185              | LPG                      |
| 126 | Junior Officer / Cadet | 1.0         | 12                | 12                | 1                | 1                | 220              | Container ship           |



продовження таблиці А-2

| №   | Ранг          | Опит,<br>років | TCPA<br>135<br>Give<br>Way | TCPA<br>135<br>Stand<br>On | CPA<br>135<br>Give<br>Way | CPA<br>135<br>Stand<br>On | Довжина<br>судна, м | Тип судна    |
|-----|---------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|
| 127 | 2nd Officer   | 2.5            | 15                         | 18                         | 2.1                       | 2.1                       | 187                 | Container    |
| 128 | Chief Officer | 9.0            | 12                         | 24                         | 1                         | 1                         | 240                 | container    |
| 129 | Chief Officer | 6.0            | 6                          | 12                         | 2                         | 3                         | 220                 | oil tanker   |
| 130 | Chief Officer | 10.0           | 6                          | 12                         | 0.5                       | 0.5                       | 270                 | Dredger      |
| 131 | 2nd Officer   | 4.0            | 20                         | 20                         | 0.5                       | 1                         | 300                 | bulk carrier |
| 132 | 2nd Officer   | 3.0            | 15                         | 10                         | 2                         | 1                         | 110                 | tanker       |

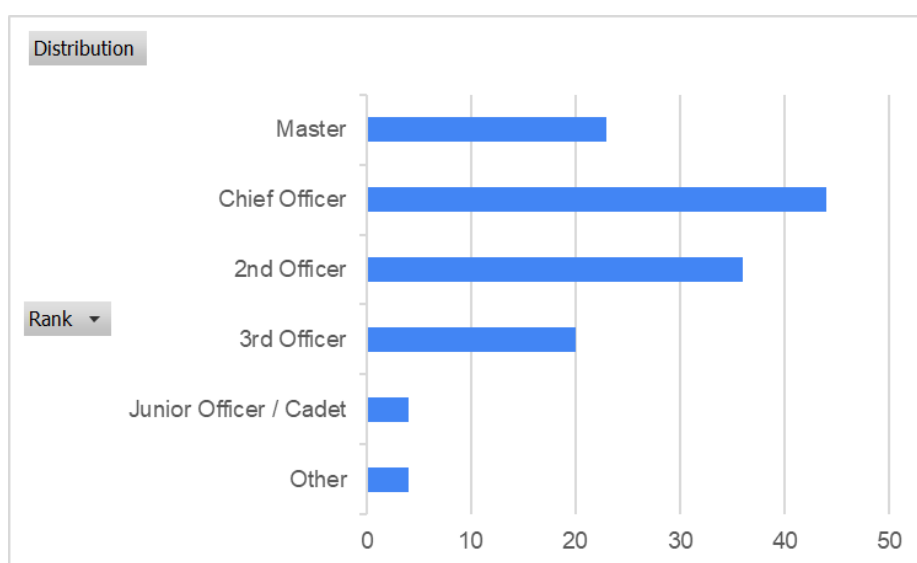


Рис. А-1. Розподіл опитуваних по рангам

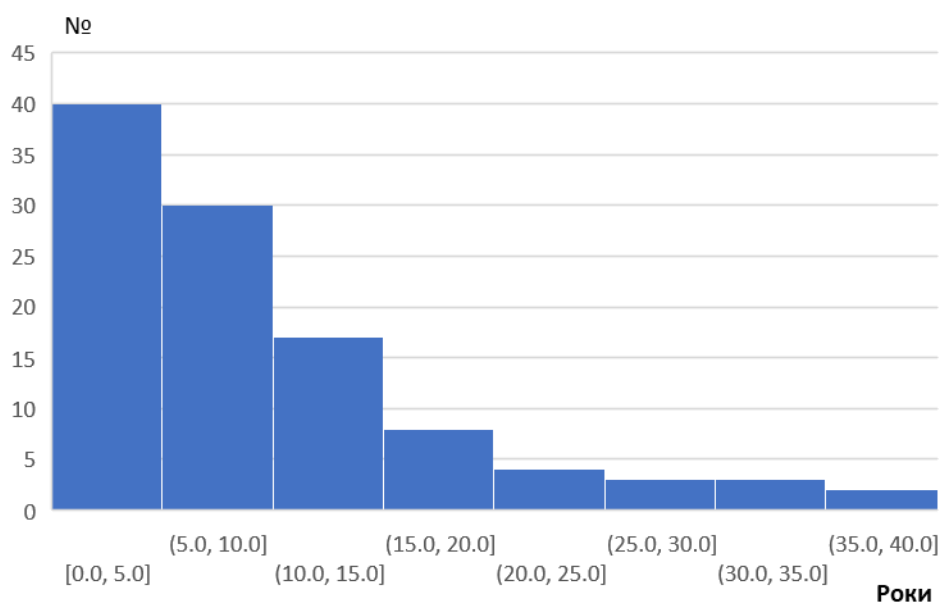


Рис. А-2. Розподіл опитуваних по рокам

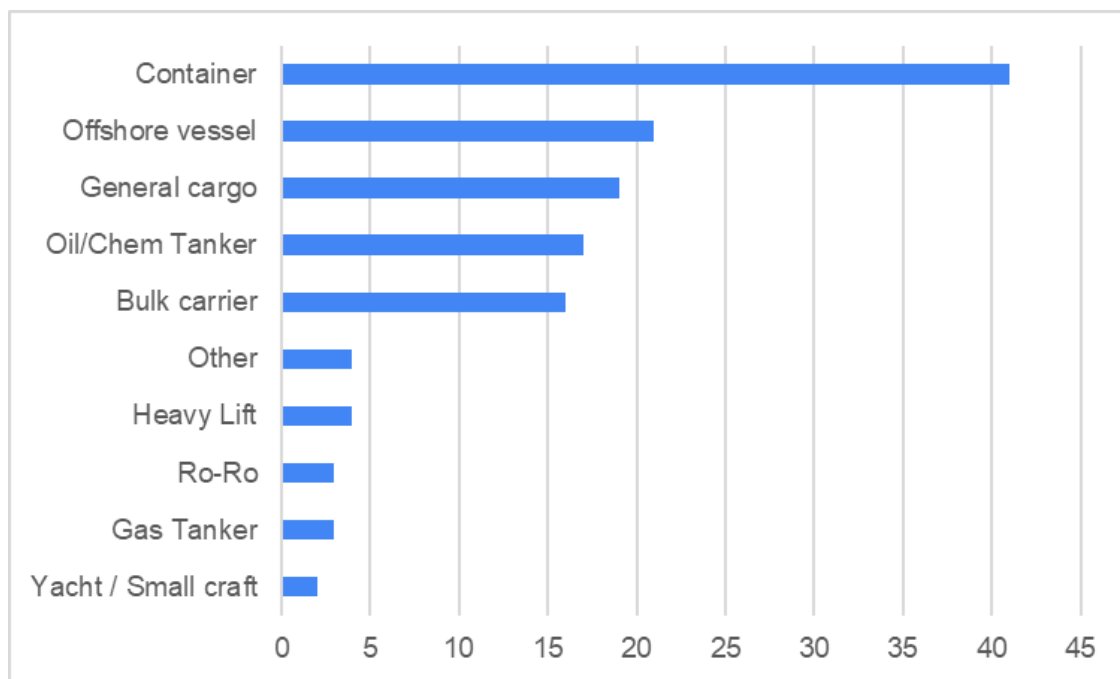


Рис. А-3. Розподіл опитуваних по типам суден

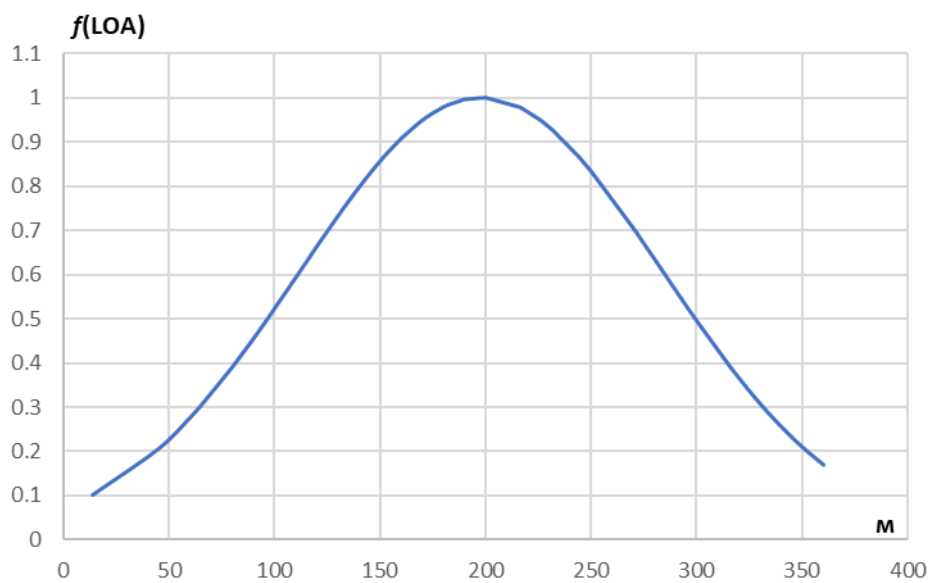


Рис. А-4. Щільність розподілу довжин суден у опитуванні

**ДОДАТОК Б – АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**



**MSC CREWING SERVICES LLC**

# АКТ

## про практичне застосування результатів дисертаційних досліджень здобувача наукового ступеня Піпченка Олександра Дмитровича

Цим актом підтверджується, що ряд результатів дисертаційної роботи Піпченка Олександра Дмитровича «Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач» використовується у процесі підготовки судноводіїв та експлуатації суден,

Зокрема, це:

- методика розрахунку параметрів безпеки для налаштування системи ЕКНІС на борту судна;
- методика оцінки навігаційних ризиків під час планування маршруту судна;
- методика підготовки судноводіїв за дисциплінами «Планування маршруту з ЕКНІС», «Навігація за допомогою РЛС».

Заступник директора з оцінки  
кваліфікації плавскладу

Г. О. Іванов

**Capt. Gennadiy Ivanov**  
Dep., General Manager (Training)  
MSC Crewing Services LLC

03 червня 2020



MSC CREWING SERVICES LLC  
92-V, Lustdorfskaya Road  
Odessa 65088 – Ukraine  
Tel: +38 0482 333 893  
Fax: +38 0487 055 200  
E-mail: info@msccs.com

ТОВ «ЕМ ЕС СІ КРЮІНГ СЕРВІСЕС»  
Україна, 65088, м. Одеса  
Люстдорфська дор., 92-В  
Тел: +38 0482 333 893  
Факс: +38 0487 055 200  
Web: www.msccs.com

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор  
Національного університету  
«Одеська морська академія»,д.ю.н., професор  
О. М. Шемякін» червня 2020 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Піпченка Олександра Дмитровича на тему «Розвиток теорії та практики  
управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач» у  
навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М. М., декан факультету судноводіння, д.т.н., професор Цимбал М. М. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Піпченка Олександра Дмитровича впроваджені у навчальний процес на факультеті судноводіння:

- результати дисертаційних досліджень здобувача було використано під час розробки навчальної програми та матеріалів дисципліни «Навігаційні інформаційні системи (ЕКНІС)», яка викладається для бакалаврів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Навігація і управління морськими суднами» відповідно до освітньо-професійної програми підготовки.

Начальник навчального  
відділу

Пархоменко М. М.

Декан факультету судноводіння, д.т.н.,  
професор

Цимбал М. М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи  
Херсонської державної морської академії  
к.т.н., професор А.П. Бень



20 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Піпченка Олександра Дмитровича на тему «Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач» в наукових дослідженнях, які виконувались і виконуються в академії

Ми, що нижче підписались, начальник відділу технічної інформації академії Блах І.В., провідний фахівець відділу технічної інформації Голікова І.В. склали цей акт у тому, що:

Результати дисертаційної роботи Піпченка О.Д. увійшли складовою частиною у звіт з НДР:

1. «Створення високоточних інтелектуальних систем управління рухом морських суден військового і цивільного призначення», ХДМА, Херсон – 2017-2018 рр. (номер держреєстрації 0117U002176, науковий керівник – Бень А.П., розділ 2 «Управління рухом морського судна в високоточних інтелектуальних системах»;

2. «Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден», ХДМА, Херсон – 2019-2020 рр. (номер держреєстрації 0119U100948, науковий керівник – Бень А.П., розділ 2 «Підвищення точності маневрування судна з системою динамічного позиціонування».

Начальник відділу  
технічної інформації ХДМА,

І.В. Блах

Провідний фахівець

І.В. Голікова

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Ректор Херсонської державної  
морської академії, професор  
В.В. Чернявський  
« \_\_\_\_\_ » 2020 р.



### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Піпченка Олександра Дмитровича на тему «Розвиток теорії та практики  
управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач» у  
навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписались, декан факультету судноводіння, доцент Нагрибельний Я.А., завідувач кафедри управління судном к.т.н., к.д.п. Товстокорий О.М., доцент кафедри управління судном к.т.н. Зінченко С.М. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Піпченка Олександра Дмитровича впроваджені у навчальний процес на факультеті судноводіння.

Результати дисертаційних досліджень здобувача було використано під час розробки навчальної програми та матеріалів дисципліни «Управління судном», яка викладається для бакалаврів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Навігація і управління морськими суднами» відповідно до освітньо-професійної програми підготовки, у тому числі:

- методику виявлення небезпечних ситуацій для буксирних суден під час ескортних операцій;
- відповідну комп'ютерну програму.

Декан факультету судноводіння,  
доцент



Я.А. Нагрибельний

Завідувач кафедри  
управління судном,  
к.т.н., к.д.п.



О.М. Товстокорий

Доцент кафедри управління судном



С.М. Зінченко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Перший проректор  
Національного університету  
«Одеська морська академія»,  
д.ю.н., професор  
О. М. Шемякін



*[Signature]*

« 04 » червня 2020 р.

#### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Піпченка Олександра Дмитровича на тему «Розвиток теорії та практики  
управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач» у  
навчальному процесі університету

Цим актом засвідчується, що у «Інституті післядипломної освіти» «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія» були впроваджені у навчальний процес для слухачів курсів підготовки судноводіїв наступні результати дисертаційної роботи Піпченка Олександра Дмитровича на тему «Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач»:

- методика аналізу навігаційних інцидентів;
- методика аналізу ризиків при плануванні навігаційних операцій;
- методика підготовки судноводіїв за темами «Планування маршруту з ЕКНІС», «Навігація за допомогою РЛС».

Директор ІПО ЦПАП

*[Signature]*

Пономаренко В. В.





## АКТ

### Внедрения результатов диссертационной работы соискателя кафедры безопасности морского судоходства Национального университета "Одесская морская академия" Пипченко Александра Дмитриевича

Данным актом подтверждаем, что результаты диссертационных исследований, Пипченко А. Д. были внедрены в процесс подготовки судоводителей по дисциплинам «Работа буксирных судов в группе при буксировке барж» и «Управление ресурсами ходового мостика», а именно:

- методика определения опасных режимов движения при работе с буксирами;
- методика оценки и управления рисками при планировании операций группы судов.

**Управляющий директор КМА**

**Ковтуненко Д.Н.**

**01.06.2020**



### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційних досліджень

Цим актом засвідчується, що у приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» були впроваджені у навчальний процес для слухачів курсів підготовки судноводіїв наступні результати дисертаційної роботи Піпченка Олександра Дмитровича «Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач»:

- методика аналізу навігаційних інцидентів;
- методика визначення небезпечних режимів роботи буксирів під час ескортних операцій;
- методика аналізу ризиків при плануванні навігаційних операцій.

Директор  
«Інституту післядипломної освіти»  
«Одеський морський тренажерний центр»  
к.т.н., професор

10.06.2020



Піпченко Ю. В.