

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

Кваліфікаційна наукова  
робота на правах рукопису

ДУДЧЕНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 629.1

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ**  
**СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ**

Спеціальність 275 «Транспортні технології»  
Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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

\_\_\_\_\_ С.В. Дудченко

Науковий керівник: Макарчук Дмитро Володимирович  
Кандидат технічних наук, доцент

Херсон – 2025

## АНОТАЦІЯ

**Дудченко С.В. Методи та моделі підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.** – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – транспортні технології. Дисертацію виконано у Херсонській державній морській академії, Херсон. Подано на захист у Херсонську державну морську академію, Херсон, 2025.

У дисертаційній роботі виконано *актуальне наукове завдання* щодо розроблення методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу шляхом розробки науково-методичного апарату комплексного аналізу та прогнозування стану навігаційної обстановки з урахуванням впливу суперечливих або недостатньо структурованих чинників.

Висока аварійність світового флоту, особливо у сфері навігації (60 - 70% від загального числа) є комплексною проблемою. Незважаючи на минулі десятиліття, кількість зіткнень та навалів залишається стабільно високою. Помилки судноводіїв, а саме нехтування правилами судноплавства, неправильна оцінка ризиків та недотримання швидкісного режиму, є причиною близько 80% морських інцидентів. Тому забезпечення навігаційної безпеки водного транспорту вимагає системного підходу.

Основоположним принципом безпечного судноводіння є ретельне планування маршруту. Традиційно судноводії використовують для цього навігаційні карти, як паперові, так і електронні. Згідно з міжнародними стандартами (STCW-78, SOLAS-74, A.893(19)), оптимальність обраного маршруту безпосередньо впливає на безпеку плавання. Проте, "ручне" планування маршруту має суттєві обмеження. Це пов'язано з суб'єктивністю оцінки судноводієм ризиків, а також складністю повного врахування судноводієм всіх факторів, що впливають на безпеку плавання.

До них відносяться: дотримання міжнародних норм, маневрені характеристики судна, вплив гідрометеорологічних умов, особливості навігації в складних умовах обстановки тощо.

Ефективність вирішення проблеми залежить від функціоналу системи управління судном та здатності судноводіїв розробляти оптимальні стратегії планування маршруту, забезпечення безпеки та ефективного управління судном. Значні досягнення в науці та техніці останніх років, зокрема впровадження систем GNSS, AIS та ECDIS, дозволили автоматизувати збір та обробку даних про координати судна, навколишнє середовище та параметри руху, що значно підвищило якість навігаційного забезпечення та управління судном. Існуючі методи роботи з навігаційною інформацією не дозволяють повною мірою використовувати її потенціал. Необхідно розробляти нові підходи, які б дозволяли судноводіям швидко й ефективно виділяти найважливіші дані та приймати на їх основі оптимальні рішення.

*Метою* роботи є підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу на основі використання знання-орієнтованих технологій.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі *часткові завдання*:

1) аналіз особливостей планування переходу суден в рамках вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки;

2) розробка математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки і планування оптимального маршруту переходу суден;

3) удосконалення методів підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу;

4) оцінка ефективності удосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.

*Об'єкт дослідження*: процеси планування переходу суден в рамках вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки.

*Предметом дослідження є методи та моделі планування переходу суден.*

*Наукова новизна одержаних результатів* полягає в тому, що:

1) *розроблено математичну модель* навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, основу якої, на відміну від відомих, складає формалізм дискретних дієвих систем з елементами нечіткого логічного виведення, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання;

2) *удосконалено метод* формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден, який полягає у застосуванні математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки у процесі прийняття рішень та оцінки впливу погодних умов на ефективність руху при формуванні правил роботи клітинного автомату для побудови маршрутів руху судна;

3) *модернізовано метод* формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який, на відміну від відомих, використовує математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна.

Використання запропонованого підходу дозволяє зменшити час підготовки даних про навігаційну обстановку в 4 рази порівняно з ручним способом і в 1,3 рази порівняно з існуючими автоматизованими системами; підвищити ймовірність своєчасного вирішення завдань інформаційного забезпечення на 70% порівняно з існуючими методами; підвищити коефіцієнт повноти врахування чинників на 16-34% порівняно з відомими методами.

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

Робота продовжує дослідження щодо підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу, пов'язані із застосуванням технології e-Navigation. Дисертаційна робота пов'язана з виконанням НДР «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та

морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» № ДР (РК) 0120U104335 відповідно до Тематичного плану наукових досліджень і розробок.

Напрямок досліджень корелюється з Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року (затверджена Постановою КМУ від 30 травня 2018 року №430-р згідно з Указом Президента України від 30 вересня 2019 року № 722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року»).

*Методи дослідження.* У ході виконання роботи використані методи системного аналізу, теорії оптимального управління, нечітких множин і нечіткої логіки, клітинних автоматів; технології розробки програмного забезпечення.

*Обґрунтованість і достовірність* одержаних наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою наукового завдання, адекватним використанням відомих методів наукових досліджень на всіх етапах виконання роботи й аналізу результатів, їх задовільним збігом з відомими положеннями сучасної науки та експериментальними даними, результатами моделювання, апробацією та публікацією основних результатів.

**Наукове значення роботи** полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ побудови та застосування систем підтримки прийняття рішень під час планування переходу.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у доведенні запропонованих теоретичних методів до їх практичної реалізації, що дозволяє:

- автоматизувати процес планування маршруту судна;
- ефективно моделювати динамічні процеси в системі "судно-середовище" з урахуванням неточностей та невизначеностей за допомогою використання продукційних правил та функцій приналежності;
- визначати можливості руху судна відповідно до впливу

гідрометеорологічних умов у району плавання.

Основні результати досліджень рекомендується використовувати при розробці автоматизованих систем управління безпекою судноплавства; у науково-дослідних організаціях для обґрунтування напрямків удосконалення і розробки математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем управління безпекою судноплавства; у вищих навчальних закладах для підготовки фахівців зі спеціальності навігація та управління морськими суднами.

Основні положення дисертаційної роботи *реалізовані у:*

– навчальному процесі кафедри судноводіння при викладанні освітніх компонент «Навігація і лоція» та «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» – математична модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та оптимального маршруту переходу суден, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек;

– процесі підвищення безпеки судноплавства у судноплавній компанії «Marlow Navigation Ukraine» – метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден, що дозволяє забезпечити мінімальні витрати палива.

**Ключові слова:** судно, навігаційна безпека, e-Navigation, складні навігаційні умови, небезпечна ситуація, планування переходу, судноводій, система підтримки прийняття рішень, маршрут, клітинний автомат, нечітка множина, нечітка логіка.

## ABSTRACT

### **Dudchenko S.V. Methods and models for improving the navigational safety of ships during transition planning.**

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 275 - Transport Technologies. The dissertation was completed at Kherson State Maritime Academy, Kherson. Submitted for defence to Kherson State Maritime Academy, Kherson, 2025.

The thesis solves an *urgent scientific task* of developing methods and models for improving the navigational safety of ships during the transition planning by developing a scientific and methodological apparatus for comprehensive analysis and forecasting of the state of the navigational situation, considering the influence of conflicting or insufficiently structured factors.

The high accident rate of the global fleet, especially in the field of navigation (60-70% of the total), is a complex problem. Despite the past decades, the number of collisions and groundings remains consistently high. Shipmasters' errors, such as disregard for navigation rules, incorrect risk assessment and non-compliance with the speed limit, cause about 80% of maritime incidents. Therefore, ensuring the navigation safety of water transport requires a systematic approach.

The fundamental principle of safe navigation is careful route planning. Traditionally, navigators use both paper and electronic charts for this purpose. According to international standards (STCW-78, SOLAS-74, A.893(19)), the optimality of the chosen route directly affects the safety of navigation. However, manual route planning has significant limitations. This is due to the subjectivity of the shipmaster's risk assessment, as well as the difficulty of fully considering all factors affecting navigation safety. These include compliance with international standards, manoeuvring characteristics of the vessel, the impact of hydrometeorological conditions, navigation in difficult conditions, etc.

The effectiveness of solving the problem depends on the functionality of the

ship's control system and the ability of shipmasters to develop optimal strategies for route planning, safety and efficient ship management. Significant advances in science and technology in recent years, including the introduction of GNSS, AIS and ECDIS systems, have made it possible to automate the collection and processing of data on ship coordinates, environment and movement parameters, which has significantly improved the quality of navigation support and ship management. Existing methods of working with navigation information do not allow for the full use of its potential. It is necessary to develop new approaches that would allow navigators to quickly and efficiently identify the most important data and make optimal decisions based on it.

The *purpose* of the study is to improve the navigational safety of ships during the transition planning based on the use of knowledge-based technologies.

To achieve this goal, the following *partial research objectives* were solved:

- 1) to analyse the peculiarities of vessel crossing planning in the framework of solving the tasks of ensuring navigation safety;
- 2) development of a mathematical model of the navigational situation for planning a guaranteed lane of conduct and planning the optimal route for vessel passage;
- 3) improvement of methods for enhancing navigational safety of ships during the transition planning;
- 4) evaluation of the effectiveness of improved methods and models for improving the navigational safety of ships during the transition planning.

*Object of research:* processes of vessel passage planning as part of solving the problems of ensuring navigation safety.

*The subject of the study* is methods and models of vessel passage planning.

*The scientific novelty of the results* is that:

- 1) a mathematical model of the navigational situation for planning the guaranteed lane of conduct and planning the optimal route of vessel passage *has been developed for the first time*, which, unlike the known ones, is based on the formalism of discrete effective systems with elements of fuzzy logical inference;
- 2) the method of forming a safe optimal route for vessel passage in terms of

fuel consumption *has been improved*, which consists in the use of the mathematical apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic in the process of decision-making and assessment of the impact of weather conditions on traffic efficiency when forming the rules of operation of a cellular automaton for building vessel routes;

3) the method of forming a safe optimal route for vessel passage in terms of time of movement, considering the forecast of weather conditions, which, unlike the known ones, uses the mathematical apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic to determine the possibilities of vessel movement in accordance with the influence of hydrometeorological conditions, *has been improved*.

Using the proposed approach allows to reduce the time for preparing data on the navigation situation by 4 times compared to the manual method and by 1.3 times compared to existing automated systems; to increase the probability of timely solving information support tasks by 70% compared to existing methods; to increase the coefficient of completeness of factors by 16-34% compared to known methods.

*Relationship to scientific programmes, plans, topics, grants.*

The work continues theoretical and applied research on improving the navigational safety of ships during transition planning, related to the use of e-Navigation (e-Voyager) technology. The dissertation work is related to the implementation of research work in accordance with the Thematic Plan of Research and Development: Research and development work 'Models and methods for predicting the durability of river and sea transport equipment in operation by technical condition' No. DR (RK) 0120U104335.

The chosen direction of research is correlated with the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030 (approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 30 May 2018 No. 430-r in accordance with the Decree of the President of Ukraine of 30 September 2019 No. 722/2019 'On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period up to 2030').

*Research methods.* In the course of the study, the following methods were

used: system analysis; optimal management theory; fuzzy sets and fuzzy logic; fuzzy cellular; software development technology.

*The validity and reliability of the scientific results, conclusions and recommendations* are confirmed by the correct formulation of the scientific task, adequate use of known research methods at all stages of the work and analysis of the results, their satisfactory coincidence with the known provisions of modern science and experimental data, modelling results, testing and publication of the main results.

*The scientific significance of the work* lies in the further development of the theoretical and applied foundations for the construction and application of decision support systems in transition planning.

*The practical significance of the results* is to bring the proposed theoretical methods to their practical implementation. The obtained practical results allow:

automate the process of ship route planning;

to effectively model dynamic processes in the ship-environment system, considering inaccuracies and uncertainties through the use of product rules and membership functions;

to determine the ship's movement possibilities in accordance with the influence of hydrometeorological conditions in the navigation area.

*The main research results are recommended to be used* in the development of automated navigation safety management systems on modern platforms; in research organisations; to substantiate the directions of improvement and development of mathematical and software of automated navigation safety management systems; in higher education institutions; for training specialists in navigation and control of marine vessels.

The main provisions of the dissertation are *implemented* in:

- the educational process of the Faculty of Navigation at the Department of Navigation when teaching the educational components 'Navigation and Location' and 'Ensuring Navigation Safety' for applicants for the first (bachelor's) level of higher education - a mathematical model of the navigation situation for planning a

guaranteed lane of wiring and planning the optimal route for the transition of ships, which allows to increase the efficiency and accuracy of modelling a complex navigation situation with a large number of navigation hazards;

- in the process of improving the safety of navigation in the shipping company 'Marlow Navigation Ukraine' - a method of forming a safe optimal route for the transition of vessels, optimal in terms of fuel consumption, which allows to ensure minimal fuel consumption;

*Keywords:* vessel, navigation safety, e-Navigation, difficult navigation conditions, dangerous situation, transition planning, navigator, decision support system, route, cellular automaton, fuzzy set, fuzzy logic.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Основні наукові результати**Публікації, що проіндексовані у базах даних Scopus*

1. Tymochko O. Development of a Virtual Environment for Monitoring Underwater Electrical Cables by an Autonomous Underwater Vehicle Based on Fuzzy Cellular Automata / O. Tymochko, O. Sotnikov, S. Dudchenko, D. Makarchuk, A. Zazirnyi, O. Kolodiazhnyi // *Problemele energeticii regionale*. – 2024. – 3(63) – С. 130-145. (Внесок автора: розроблено метод синтезу Парето-оптимального маршруту судна, що забезпечує мінімальну витрату палива за мінімальний час обстеження кабелю і задовольняє заданій системі обмежень).

2. Dudchenko S. Application of fuzzy cellular automata to optimize a vessel route considering the forecasted hydrometeorological conditions / S. Dudchenko, O. Tymochko, D. Makarchuk, A. Golovan // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 1 №3(127) – С. 28-37 (Внесок автора: розроблено метод побудови оптимального за витратою палива при заданому рівні безпеки для судна і вантажу маршруту руху судна).

3. Ponomaryova V. Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions / Ponomaryova V., Nosov P., Ben A., Popovych I., Prokopchuk Y., Mamenko P., Dudchenko S., Appazov E., Sokol I. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 1 №3(127) – С. 6-26 (Внесок автора: запропоновано формально-логічну модель виявлення інтуїтивних дій судноводія-оператора).

*Публікації у фахових виданнях категорії «Б»*

4. Plotnikov V. I. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex / S. V. Dudchenko, G. S. Abramov, D. V. Makarchuk // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – 2023. – № 1–2 (26–27) – С. 82-95 (Внесок автора: проведено оцінку ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу та їх моделювання).

5. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден / С.В. Дудченко // Водний транспорт. – 2023. – №3(38). – С. 277-286.

6. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна / С.В. Дудченко // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2023. – Вип. 47 – С. 305-312.

*Апробація наукових результатів*

7. Дудченко С. В., Макаруч Д. В., Литовченко В. І., Ісайчев А. Г., Жмур В. М. Метод оптимізації безпечного маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов та ефективного використання палива : XVI міжнар. наук.-практ. конф. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) : тези доп., 29-31 трав.. 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 299–202.

8. Дудченко С. В., Оптимізація маршруту суден з урахуванням безпеки та прогнозу погоди, матеріали VIII Міжнародної наукової конференції «Традиційні та інноваційні підходи до нвукових досліджень», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Дрогобоич, Україна, С. 313-320

9. Дудченко С. В., Удосконалення моделі планування смуги проводки та маршрутів суден, матеріали VII International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Валенсія, Іспанія, С. 176-181.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	15
ВСТУП .....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ СУДЕН В РАМКАХ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ.....	25
1.1 Аналіз основних процесів планування переходу суден.....	25
1.2 Аналіз нормативних документів, що регламентують порядок вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки .....	30
1.3 Аналіз наукових досліджень з питань планування переходу суден у рамках вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки .....	32
1.4 Постановка завдання наукового дослідження з підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.....	39
Висновки за першим розділом.....	45
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ.....	47
2.1 Визначення загальних вимог, обмежень та припущень до моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.....	47
2.2 Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна .....	56
2.3 Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для	

планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту	переходу	63
суден.....		
Висновки	за	другим
розділом.....		73
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА Й УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ.....		
75		
3.1 Визначення загальних вимог, обмежень та припущень до методів підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.....		76
3.2 Удосконалення методу формування безпечного та оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов.....		80
3.3 Удосконалення методу формування безпечного та оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов.....		88
Висновки за третім розділом .....		97
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ.....		
99		
4.1 Визначення показників ефективності вдосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.....		99
4.2 Розробка пропозицій щодо реалізації удосконалених методів та моделей в середовищі MatLab.....		106
4.3 Розрахунок показників та оцінка ефективності удосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування		112

переходу.....				
4.4 Оцінка	обґрунтованості	прийняття	рішень	117
судноводієм.....				
4.5 Оцінка	рівня		можливих	119
помилوک.....				
Висновок за четвертим розділом.....				121
ВИСНОВКИ .....				123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....				126
ДОДАТКИ.....				144

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

AIS	– система автоматичної ідентифікації
ARPA	– автоматичні засоби радіолокаційного визначення
COLREGs	– Міжнародні правила запобігання зіткнення суден
DEVS	– дискретна дієва система
ECDIS	– електронна карта та інформаційна система
EEDI	– індекс енергоефективності
e-Navigation	– е-навігація
ETA	– орієнтовний час прибуття
ETD	– орієнтовний час відправлення
FCA	– нечіткий клітинний автомат
GMDSS	– глобальна морська система безпеки в разі лиха
IALA	– Міжнародна асоціація морських засобів навігації та маякових органів

ICOAD	– використання великих даних
IMO	– міжнародна морська організація
LRIT	– система ідентифікації та відстеження на великі відстані
MARPOL	– Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден
MR	– район плавання
PRM	– імовірнісна дорожня карта
RRT	– випадкове швидко досліджуване дерево
SHOPERA	– енергоефективна безпечна експлуатація суден
SOLAS	– Міжнародна конвенція про охорону людського життя на морі
UKC	– глибина під кілем
UNCLOS	– Конвенція ООН з морського права
VTB	– служба руху суден
ГНСС	– глобальна навігаційна супутникова система
ЄЕК	– Європейська економічна комісія
IMO	– Міжнародна морська організація
ІНМТ2	– ієрархічна нечітка множина типу 2
ІНПМ	– ієрархічна нечітка продукційна модель
МПП	– морське просторове планування
НМТ1	– нечітка множина типу 1
РЛЗ	– радіолокаційний засіб
РСКП	– радіальна середньоквадратична похибка
СІП	– система інформаційного простору
СППР	– система підтримки прийняття рішення
СУРС	– система управління рухом судна

## ВСТУП

Морський транспорт є життєво важливим для глобальної економіки, забезпечуючи понад 90% світових вантажоперевезень. Проте, висока аварійність світового флоту, особливо у сфері навігації (60 - 70% від загального числа) [95] є викликом для безпеки судноплавства, та є комплексною проблемою. Незважаючи на минулі десятиліття, кількість зіткнень та навалів залишається стабільно високою. Помилки судноводіїв, а саме нехтування правилами судноплавства, неправильна оцінка ризиків та недотримання швидкісного режиму, є причиною близько 80% морських інцидентів. Тому забезпечення навігаційної безпеки водного транспорту вимагає системного підходу.

Основоположним принципом безпечного судноводіння є ретельне планування маршруту. Традиційно судноводії використовують для цього навігаційні карти, як паперові, так і електронні. Згідно з міжнародними стандартами, оптимальність обраного маршруту безпосередньо впливає на безпеку плавання. Проте, "ручне" планування маршруту має суттєві обмеження. Це пов'язано з суб'єктивністю оцінки судноводієм ризиків, а також складністю повного врахування судноводієм всіх факторів, що впливають на безпеку плавання. До них відносяться: дотримання міжнародних норм, маневрені характеристики судна, вплив гідрометеорологічних умов, особливості навігації в складних умовах обстановки тощо.

Ефективність вирішення проблеми залежить від функціоналу системи управління судном та здатності судноводіїв розробляти оптимальні стратегії планування маршруту, забезпечення безпеки та ефективного управління судном. Значні досягнення в науці та техніці останніх років, зокрема впровадження систем GNSS, AIS та ECDIS, дозволили автоматизувати збір та обробку даних про координати судна, навколишнє середовище та параметри руху, що значно підвищило якість навігаційного забезпечення та

управління судном. Існуючі методи роботи з навігаційною інформацією не дозволяють повною мірою використовувати її потенціал. Необхідно розробляти нові підходи, які б дозволяли судноводіям швидко й ефективно виділяти найважливіші дані та приймати на їх основі оптимальні рішення.

Перспективними напрямками підвищення навігаційної безпеки при плануванні маршруту фахівці вважають такі:

– розробка інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень: системи, які не лише виконують рутинні команди, а надають судноводію рекомендації щодо вибору оптимального варіанту маршруту;

– створення цифрових двійників суден: віртуальні моделі суден, які дозволяють моделювати різні сценарії й оптимізувати маршрут і роботу судна;

– використання великих даних: збір та обробка великих обсягів даних в системі "судноводій-судно-навігаційна обстановка" для створення інтелектуальних методів планування маршруту судна;

– розроблення стандартів і протоколів для взаємодії між суднами і береговими службами: забезпечення сумісності різних систем і безпечного обміну даними.

Впровадження систем автоматизованого планування та оптимізації маршруту дозволяє підвищити безпеку судноплавства шляхом комплексного аналізу великих обсягів даних та розробки оптимальних маршрутів з урахуванням факторів навігаційної обстановки. Це дозволить зменшити вплив людського фактору на прийняття рішень та підвищити ефективність судноплавства в цілому.

**Актуальність теми.** Планування безпечного та ефективного морського переходу є складним процесом, що вимагає від судноводія вирішення низки взаємопов'язаних задач:

1. Прогнозування навігаційної обстановки.
2. Визначення альтернативних маршрутів.
3. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності переходу

#### 4. Управління судном.

Процес планування переходу, що в даній роботі розглядається як задача підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, являє собою слабо структуровані або неструктуровані задачі. Слабо структуровані задачі характеризуються кількісними й якісними параметрами, при чому кількість перших значно поступається кількості якісних. До того ж подібні задачі важко розв'язуються методами безпосереднього перетворення даних через те, що постановка задачі передбачає прийняття рішень в умовах неповної інформації. Формальні схеми розв'язання таких задач є складними через наявність фактично не формалізовуваних процедур. Ця невизначеність є систематичною й обумовлена складністю завдань, лімітом часу на прийняття рішень, особливостями сприйняття і дефіцитом інформації та іншими факторами.

Проблемами автоматизації завдань оцінки навігаційної обстановки та підтримки прийняття рішення при плануванні маршруту переходу судна присвячені роботи вітчизняних та закордонних авторів: Вагуценка Л.Л. [94], Ганношиної І.М. [101], Голікова В.В. [102], Зазірного А.А. [109], Кульбацький А.А. [117], Мальцева А.С. [118], Маменка П.П. [119], Масіка І.П. [120], Мельника О.М. [121], Соколенка В.І. [141], Тимошук О.М. [145], Цимбала М.М. [14], Шумілова К.В. [149], Шишкін О.В. [148], Dyrzc S. [18], Perera L.P., Guedes Soares C. [51], Zis T., Psaraftis H., Ding L. [96], Vettor R., Szlapczynska J., Szlapczynski R., Tycholiz W. [69], Lee H., Choi H., Jeongseok L., Yang H. [91], Iphar C., Joussetme A.L. [30], Kytariolou A., Themelis N. [40], та інші.

Разом із тим, на практичному рівні не в повній мірі розв'язана задача формального опису самого процесу планування проходу судна в умовах динамічної зміни навігаційної обстановки. Також недостатньо опрацьований науково-методичний апарат (підходи, алгоритми, методики) комплексного аналізу та прогнозування стану навігаційної обстановки за умов впливу чинників, відомості про які є не структурованими або навіть суперечливими. Оскільки процес планування і здійснення проходу судна зазвичай

відбувається в просторі нечітких змінних, то факторний простір та набір продукційних правил для опису цього процесу доцільно подавати у вигляді лінгвістичних змінних із залученням елементів теорії нечітких множин і нечіткої логіки. Проблему побудови внутрішньої логіки структурування множини продукційних правил для зменшення кількості звернень до експерта можна вирішити із застосуванням методів штучного інтелекту.

Таким чином, проведене дослідження сучасного стану розробок у цій галузі та ключових напрямків удосконалення спеціалізованого математичного і програмного забезпечення для вирішення завдань у процесі планування та виконання переходу судна демонструє, що створення методів і моделей для підвищення рівня навігаційної безпеки суден під час планування переходу є *актуальним науковим завданням*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Зміст та основні завдання дисертаційної роботи відповідають головним вимогам, що пов'язані із національною транспортною стратегією України на період до 2030 року, концепцією реформування транспортного сектору економіки та Морською доктриною на період до 2035 року. Дисертаційні дослідження виконані на кафедрі управління судном та кафедрі судноводіння у межах тематичних планів Херсонської державної морської академії. Дослідження були використані в звітах з науково-дослідницької роботи: «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» № ДР (РК) 0120U104335, і є складовими частинами планових робіт щодо дослідження питань, пов'язаних з процесами вироблення рішення судноводієм у процесі планування переходу судна.

*Мета і завдання дослідження.* Метою роботи є підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу на основі використання нових методів, моделей і знання-орієнтованих технологій. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі часткові завдання:

- 1) аналіз особливостей планування переходу суден в рамках вирішення

завдань забезпечення навігаційної безпеки;

2) розробка математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден;

3) удосконалення методів підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу;

4) оцінка ефективності удосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу.

*Об'єкт дослідження:* процеси планування переходу суден у рамках вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки.

*Предмет дослідження:* методи та моделі планування переходу суден.

*Методи дослідження:* системного аналізу – при аналізі можливостей судових систем підтримки прийняття рішення судноводієм з метою вивчення процесів збору та обробки даних про навігаційну обстановку та обґрунтування необхідності використання характеристик навігаційної небезпеки для підвищення оперативності та обґрунтованості прийняття рішень; математичної логіки – для побудови моделі процесу оцінки навігаційної обстановки на основі експертних знань, що є складовою частиною методу представлення знань про небезпечну ситуацію; теорії штучного інтелекту, включаючи методи нечіткої логіки та побудови функцій приналежності, – для побудови правил оцінки істинності відношень між поточними даними і апріорними знаннями про судноводія для технічного та біологічного сегментів ергатичної системи "судноводій – судно"; методи математичного моделювання – при побудові імітаційної математичної моделі, використовуваної для оцінки часових показників інформаційного забезпечення рішень у судовій СППР.

*Наукова новизна отриманих результатів дисертації:*

1) розроблено вперше математичну модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, основу якої, на відміну від відомих, складає формалізм дискретних дієвих систем з елементами нечіткого логічного

виведення, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек;

2) *удосконалено метод* формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден, який полягає у застосуванні математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки у процесі прийняття рішень та оцінки впливу погодних умов на ефективність руху при формуванні правил роботи клітинного автомату для побудови маршрутів руху судна;

3) *модернізовано метод* формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який, на відміну від відомих, використовує математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов.

*Практичне значення отриманих результатів* полягає в тому, що розроблені теоретичні положення та методи є основою для розробки математичного та програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень судноводія, що дозволяють підвищити навігаційну безпеку в процесі планування переходу судна.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при розробці систем автоматизованого планування переходу судна;

- у науково-дослідних організаціях – для обґрунтування напрямків розробки та удосконалення автоматизованих систем прийняття рішень;

- у вищих навчальних закладах – для підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Впровадження результатів дисертаційної роботи виконано в судноплавній компанії «Marlow Navigation Ukraine» та в освітньому процесі Херсонської державної морської академії (Додаток Б).

Одержані результати досліджень мають високий ступінь готовності до використання, тому що вони доведені до методів і моделей.

*Особистий внесок здобувача.* Нові наукові результати дисертації отримані здобувачем особисто та у співавторстві.

Основні результати дисертації опубліковані в 6 наукових публікаціях (додаток А): у [1] – Внесок автора: проведено оцінку ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу та їх математичне моделювання; у [2] – розроблено метод побудови оптимального маршруту руху судна, який дозволяє досягти мінімальну витрату палива при заданому рівні безпеки для судна і вантажу при врахуванні гідрометеорологічних умов на маршруті; у [3] – автором розроблена формально-логічну модель виявлення інтуїтивних дій судноводія-оператора; у [4] – автором запропоновано метод формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден, на основі алгоритмів роботи клітинного автомату та математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки; у [5] – автором удосконалено математичну модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги провідки та планування оптимального маршруту переходу суден; у [6] – автором удосконалено математичну модель району плавання для оптимального маршруту переходу судна, з яких 2 статті, написані здобувачем самостійно і 4 статті у співавторстві. Усі статті опубліковані у журналах та збірниках наукових праць, що входять до Переліку наукових фахових видань, дозволених для публікації отриманих при виконанні роботи результатів досліджень по технічним наукам та виданнях, наведених у переліку Scopus.

*Апробація результатів дисертації.* Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: XVI Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024)", Одеса, 2024 р.

Дудченко С. В., Макарчук Д. В., Литовченко В. І., Ісайчев А. Г., Жмур В. М. Метод оптимізації безпечного маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов та ефективного використання палива : XVI міжнар. наук.-практ. конф. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) : тези доп., 29-31 трав.. 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 299–202.

Дудченко С. В., Оптимізація маршруту суден з урахуванням безпеки та

прогнозу погоди, матеріали VIII Міжнародної наукової конференції «Традиційні та інноваційні підходи до звукових досліджень», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Дрогобоич, Україна, С. 313-320

Дудченко С. В., Удосконалення моделі планування смуги проводки та маршрутів суден, матеріали VII International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Валенсія, Іспанія, С. 176-181.

*Структура та обсяг дисертаційної роботи.* Робота викладена на 126 сторінках машинописного тексту, містить 30 рисунків, 7 таблиць, 149 літературних джерел, загальний обсяг дисертації складає 147 сторінок.

Автор висловлює глибоку вдячність науковому керівнику Макарчуку Дмитру Володимировичу за постійну увагу до роботи та наукові консультації, за допомогу та підтримку під час систематичного обговорення результатів досліджень.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ СУДЕН В РАМКАХ ВИРШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

### 1.1 Аналіз основних процесів планування переходу суден

Планування переходу судна є критично важливим аспектом морських операцій, що забезпечує ефективний і безпечний перехід судна з однієї експлуатаційної фази до іншої. Планування переходу судна передбачає сукупність скоординованих дій і рішень судноводія для переміщення судна з початкової точки маршруту в кінцеву. Цей процес має вирішальне значення для різних сценаріїв, включаючи сухе докування, технічне обслуговування, зміну екіпажу та операційні зміни. Ефективне планування переходу мінімізує час простою, оптимізує розподіл ресурсів і забезпечує відповідність нормативним вимогам.

Метою побудови та коригування маршруту переходу (руху) судна є підвищення безпеки плавання у складних районах, а саме: при проході вузькостей, районах з високою інтенсивністю руху суден, в районах навігаційних перешкод, обмежених глибин та несприятливих гідрометеорологічних умов. Розділ V Правил 34 Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі «СОЛАС» [124] і Резолюція А.893(21) [72] вказують, що ретельна організація процесу планування переходу судна судноводієм має вирішальне значення для безпечного переходу й уникнення небезпечних ситуацій. Використання відповідних навігаційних карт та посібників, а також інструкцій міжнародної морської організації (ІМО) [13] під час планування кожного маршруту переходу є основою безпечного й ефективного переходу судна. План переходу судна має врахувати відповідні системи управління рухом судна (СУРС), забезпечити безпеку руху та

врахувати гідрометеорологічні умови.

Планування переходу судна є складним оптимізаційним завданням, що передбачає пошук адекватного балансу між декількома цілями рейсу. Оптимізація планування переходу судна – це процес побудови маршруту руху, визначення порядку роботи судна та екіпажу, який проводиться судоводієм в межах обмежень, які накладаються матеріально-технічним забезпеченням, метеорологічними умовами, контрактними домовленостями та іншими обмеженнями для досягнення цілі рейсу із забезпеченням безпеки руху судна та мінімізації споживання палива. Це дозволить здійснити своєчасне прибуття в кінцевий пункт маршруту та виконати умови контракту.

У ході процесу планування переходу суден судоводії оцінюють різні варіанти, які мають задовольняти критеріям безпеки, витрати палива та тривалості рейсу. Даний процес оцінювання може бути суб'єктивним, оскільки судоводій аналізує важливість кожного критерію на основі своїх особистих суджень, цінностей та уподобань. Проте для об'єктивного прийняття рішень судоводієм аналіз варіантів має ґрунтуватись на реальних та вимірюваних даних та методах планування та прийняття рішень [140].

Згідно резолюції А.893 [84] ІМО, визначені чотири етапи планування переходу судна:

- оцінка;
- планування;
- виконання;
- моніторинг.

На першому етапі судоводій проводить збір та аналіз всієї можливої інформації щодо майбутнього переходу, на основі якої виконується загальна оцінка майбутнього переходу. Судноводій визначає райони плавання, в яких забезпечується безпека руху судна, небезпечні райони, встановлені системами судових повідомлень і службами руху суден шляхи руху; і будь-які райони, де мають братися до уваги аспекти захисту морського

середовища. При плануванні переходу судноводій має оцінити [1]:

- положення та стан судна;
- технічні та експлуатаційні характеристики судна та його обладнання;
- технічні та експлуатаційні обмеження судна;
- особливості вантажу (небезпечний, важливий тощо) і його розміщення, укладання і кріплення на судні;
- стан та компетентність екіпажу;
- перевірити документи, що стосуються судна, обладнання, екіпажу, пасажирів або вантажу, які повинні бути наявні на судні;
- перевірити та оцінити навігаційні карти відповідних районів, через які буде здійснюватися перехід, діючі постійні або тимчасові навігаційні зміни, сповіщення та радіонавігаційні попередження;
- перевірити та оцінити лоції, описи вогнів і радіотехнічних засобів навігаційного огороження;
- інформацію щодо припливів і течій;
- кліматичну, гідрографічну, океанографічну та іншу відповідну метеорологічну інформацію;
- встановлені шляхи руху суден і системи судових повідомлень, служби руху суден і заходи щодо захисту морського середовища;
- інтенсивність руху суден, яка може відзначатися під час усього переходу;
- інформацію про конкретні райони, через які буде здійснюватися перехід судна.

На другому етапі судноводій розробляє план маршруту переходу на основі оцінок, виконаних на першому етапі. Даний план має охоплювати весь перехід від порту виходу до порту призначення. Судноводій при розробці плану переходу повинен визначити:

- маршруту переходу;
- основні елементи забезпечення безпечного та ефективного плавання і захисту морського середовища під час переходу,

- необхідні зміни швидкості на маршруті;
- необхідну мінімальну глибину у небезпечних зонах та на мілководді;
- точки зміни режиму роботи машин і механізмів судна;
- спосіб та частоту визначення місця розташування;
- порядок роботи у небезпечних ситуаціях.

У ході виконання переходу судноводій повинен виконувати управління судном відповідно до плану або внесених до нього змін. Основними факторами, що впливають на рішення судноводія щодо відхилення або внесення змін до плану, є:

- низька надійність і незадовільний стан суднового навігаційного обладнання;
- розрахунковий час проходу в критичні (небезпечні) точки (райони) не співпадає з плановим;
- складні метеорологічні умови;
- небезпечні умови руху суден, особливо в районах інтенсивного судноплавства.

Під час переходу судноводій повинен постійно моніторити ситуацію та вносити корективи у план, якщо це необхідно. Це може містити:

- відстеження погодних умов та навігаційних обставин;
- реагування на непередбачені ситуації (зміна маршруту або затримки).

Врахування несприятливих гідрометеорологічних умов має вирішальне значення під час планування маршруту, тому що вони впливають на безпеку життя і здоров'я екіпажу та пасажирів, можуть пошкодити або навіть привести до повної втрати судна і вантажу. Резолюція [72] для певних районів світового океану визначає рекомендовані маршрути руху суден з урахуванням прогнозу погоди.

Оптимізація планування переходу судна – це оптимізація маршруту та роботи судна, яку судноводій може досягти в межах обмежень, які накладаються матеріально-технічним забезпеченням, метеорологічними умовами, контрактними домовленостями та ін. Судноводій має виконати

оптимізацію баласту та диференту, визначити маршрут з урахуванням метеорологічних умов з метою забезпечення безпеки руху судна та мінімізації споживання палива. Це дозволить здійснити своєчасне прибуття в кінцевий пункт маршруту та виконати умови контракту. Маршрути з урахуванням метеорологічних умов забезпечують мінімальне споживання палива, безпеку чи комфорт, мінімальну тривалість або дистанцію переходу [84, 39].

Оптимальний маршрут будується на основі прогнозів погоди, стану моря й індивідуальних характеристик судна для конкретного переходу (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Підходи щодо побудови маршруту переходу судна

При традиційному підході щодо планування з урахуванням погодних умов, не враховуються технічні та маневрені характеристики судна.

Основні фактори, що впливають на побудову маршруту, показано на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Фактори, що впливають на побудову маршруту судна

Факторами навігаційної обстановки, що впливають на перехід судна та його роботу є: напрям та швидкість вітру, висота хвиль, напрям та швидкість течії, туман, лід та ін. У свою чергу, характеристики судна необхідно розглядати як обмеження. Що стосується навігаційної інформації, обмеження можуть бути надані географічними умовами, включаючи зони з обмеженою глибиною, схеми поділу руху. Крім того, обмеження можуть виникати з розкладу рейсу, наприклад, за орієнтовним часом відправлення (ETD) і прибуття (ETA). Враховуючи всі ці впливи, оптимальне плавання з оптимальною комбінацією змінних для прийняття рішення, таких як швидкість і курс судна, зазвичай визначається шляхом математичного моделювання визначеної проблеми та застосування алгоритму оптимізації.

1.2. Аналіз нормативних документів, що регламентують порядок вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки

Навігаційна безпека охоплює широкий спектр питань, у т.ч. управління судноплавством, моніторинг навігаційних умов, а також реагування на надзвичайні ситуації. Нормативні документи, що регламентують ці питання, містять міжнародні конвенції, національні закони та підзаконні акти. Вони формують правову основу для діяльності державних органів, судноплавних компаній та інших учасників навігаційного процесу.

Основні нормативні документи що регламентують порядок вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки:

– Міжнародна конвенція про охорону людського життя на морі (SOLAS) [124]. SOLAS, будучи основним міжнародним документом, що регламентує безпеку судноплавства, містить вимоги до конструкції суден, їх обладнання й організації рятувальних операцій. Впровадження SOLAS та дотримання стандартів, встановлених у конвенції, є запорукою збереження життя людей на морі та забезпечення безпеки судноплавства. Хоча SOLAS

безпосередньо не регламентує процеси застосування e-Navigation, вона встановлює загальні вимоги до безпеки судноплавства, які повинні враховуватися при впровадженні нових технологій;

– Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден (MARPOL) встановлює вимоги щодо захисту морського середовища, які також можуть бути пов'язані з e-Navigation [29];

– Конвенція ООН з морського права (UNCLOS) визначає права й обов'язки держав у морських справах, регулює використання морських шляхів та охорону морського середовища, включаючи питання навігаційної безпеки [82]. Проте конвенція не містить конкретних положень про e-Navigation, але формує загальне правове поле, в рамках якого розвивається дана технологія;

– Документи Міжнародної морської організації (конвенції та кодекси), що регулюють різні аспекти морської діяльності, включаючи навігаційну безпеку [126]. Основним документом ІМО регулювання та стандартизації e-Navigation є резолюція А.857(20) [71]. ІМО продовжує розробляти нормативні документи, що регулюватимуть різні аспекти застосування e-Navigation, наприклад стандарти обміну даними, вимоги до обладнання, процедури безпеки тощо. На теперішній час ІМО вносить поправки до SOLAS і MARPOL та ін. для врахування нових вимог, пов'язаних з e-Navigation;

– Міжнародні правила запобігання зіткнення суден (COLREGs) визначають обов'язки судноводіїв у різних ситуаціях для уникнення зіткнень на воді та є критично важливими для забезпечення безпеки на морі [13]. Дотримання цих правил дозволяє зменшити ризик зіткнень і забезпечити безпечне судноплавство для всіх учасників. COLREGs є основою для автоматизації процесів, пов'язаних з e-Navigation, і розробки алгоритмів і систем, що автоматизують процедури прийняття рішень у різних навігаційних ситуаціях. З появою автономних суден та інших новітніх технологій правила потребують уточнення і доповнення через можливість

виникнення нових ситуацій, не передбачених при розробці COLREGs;

– Національні закони та підзаконні акти [127,129-136,138,139], що регулюють навігаційну безпеку. В Україні це – Закон України "Про морський транспорт" [128], який визначає основи державного регулювання у даній сфері.

Міжнародна регуляція e-Navigation дозволяє:

– забезпечити сумісність електронних систем, використовуваних у морській галузі, шляхом встановлення єдиних стандартів для забезпечення їх взаємодії;

– підвищити рівень безпеки судноплавства шляхом впровадження нових технологій;

– спростити міжнародну торгівлю шляхом більш швидкого та безпечного перевезення вантажів у міжнародному масштабі;

– забезпечити захист морського середовища шляхом більш ефективного моніторингу та контролю за морською діяльністю.

Міжнародна регуляція e-Navigation є необхідною для забезпечення безпеки, ефективності та сумісності електронних систем у морській галузі. ІМО відіграє ключову роль у розробці міжнародних стандартів і рекомендацій у цій сфері. Впровадження e-Navigation є складним процесом, який вимагає тісної співпраці між державами, морськими адміністраціями, промисловістю та науковими організаціями.

Нормативні документи впливають на практику забезпечення навігаційної безпеки. Вони встановлюють вимоги до навчання екіпажів, проведення технічного обслуговування суден, а також до систем моніторингу та управління судноплавством. Впровадження цих вимог сприяє зменшенню кількості аварій та інцидентів на воді.

1.3 Аналіз наукових досліджень з питань планування переходу суден у рамках вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки

Морська безпека є ключовим аспектом світової економіки, оскільки приблизно 90% світової торгівлі припадає на морські перевезення [143, 144]. Безпека є основним критерієм при прийнятті рішень судноводієм під час експлуатації судна та у критичних (небезпечних) ситуаціях. У роботі [117] показано довгострокову тенденцію щодо зниження втрат (50% відсотків протягом останніх 50 років) на водному транспорті. Однак значний тиск на експлуатаційні витрати потенційно може призвести до менших інвестицій у технічне обслуговування та безпеку, про що свідчать результати дослідницького проекту "Енергоефективна безпечна експлуатація суден" (SHOPERA) [66], наданого ІМО. Так, виконання вимог дотримання індексу енергоефективності (EEDI) можна досягти шляхом зменшення встановленої потужності силової установки замість впровадження інноваційних технологій. Але такий підхід призведе до обмеження можливостей маневреності за несприятливих метеорологічних умов.

Аналіз статистики аварій у SHOPERA показує, що забезпечення безпеки переходу судна залежить від його маневреності. Великотоннажні судна, балкари та танкери за даним критерієм є найуразливішими за несприятливих метеорологічних умов. Висота хвиль та швидкість вітру, зареєстровані під час аварій, мали досить помірні значення. Так, до 50% судноводіїв приймають рішення, коли висота хвилі досягає 5 м, а швидкість вітру 8 м/с.

Значна кількість аварій, викликана несприятливими метеорологічними умовами, сталася під час очікування на якорі та запуску рушійної установки судна з затримкою [142, 74]. У відкритих водах для забезпечення безпеки переходу судна необхідна достатня пропульсивна потужність рушійної установки та маневреність, щоб запобігти потраплянню в складні метеоумови.

У дослідженні також було визначено критерії для оцінки маневреності, роботи рушійних установок та систем рульового керування в несприятливих погодних умовах. До таких критеріїв відносяться: здатність змінювати та

підтримувати курс на носову хвилю, здатність систем рульового керування виконувати маневр у будь-якому напрямку хвилі та здатність рушійної установки підтримувати задану швидкість у різних напрямках хвилі [107]. Оцінка критеріїв показує, що граничні висоти хвиль можуть суттєво відрізнятися залежно від типу та розміру судна.

Забезпечення безпеки руху судна в екстремальних метеоумовах з урахуванням норм щодо викидів та вимог безпечної експлуатації суден потребує не тільки вдосконалення його конструкції, але й оптимізації маршруту руху відповідно до метеорологічних умов. Маршрут з урахуванням метеоумов матиме оптимальну швидкість і курс судна для запобігання виникнення небезпечних ситуацій та/або збільшення споживання палива [6, 64, 91, 97].

Для забезпечення уникнення навігаційних небезпек оптимальний план переходу необхідно розробляти з урахуванням зниження швидкості, зумовленої метеорологічними умовами та рішенням судноводія. Отже, оптимальні швидкість і маршрут, адекватне моделювання рушійної сили судна та його маневреності є критично важливими для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації та навігації.

Заходи щодо енергоефективності – це сукупність дій, спрямованих на зменшення споживання енергії та підвищення ефективності її використання. Огляд ключових сфер енергоефективності можна знайти у роботах [36-38]. Впровадження заходів з енергоефективності призводять до скорочення викидів на морському транспорті і декарбонізації морського судноплавства [3, 108, 116]. Різні маршрути переходу призводять до використання альтернативних видів палива та поєднання технічних і операційних заходів. Технічні заходи та зміни конструкції насамперед підходять для нових суден, експлуатаційні заходи можуть бути запроваджені на всіх суднах. Дослідження поєднання технічних і експлуатаційних заходів (рис. 1.3) проведено в роботі [88, 92]. Найбільший потенційний приріст енергоефективності мають такі заходи:

– технічні: зміни в конструкції судна, його системах та використовуваному паливі для зменшення енергоспоживання;

– операційні: зміни в організації роботи судна, плануванні маршрутів та стимулюванні економного використання палива.

Але кількість технічних та операційних заходів з енергоефективності є великою. Які заходи ефективності вважаються найбільш вигідними, залежить серед іншого від власника, оператора, договору фрахтування чи самого судна.



Рисунок 1.3 – Заходи, що впливають на підвищення енергоефективності

Опитування, проведене серед 149 світових судноплавних компаній, які перевозять насипні, сухі, контейнерні та змішані вантажі, показало, що моніторинг споживання палива, погодний маршрут і зниження швидкості є найкращими заходами енергоефективності (рис. 1.4). Але рівень їхнього впровадження складає лише 50-75% [88].

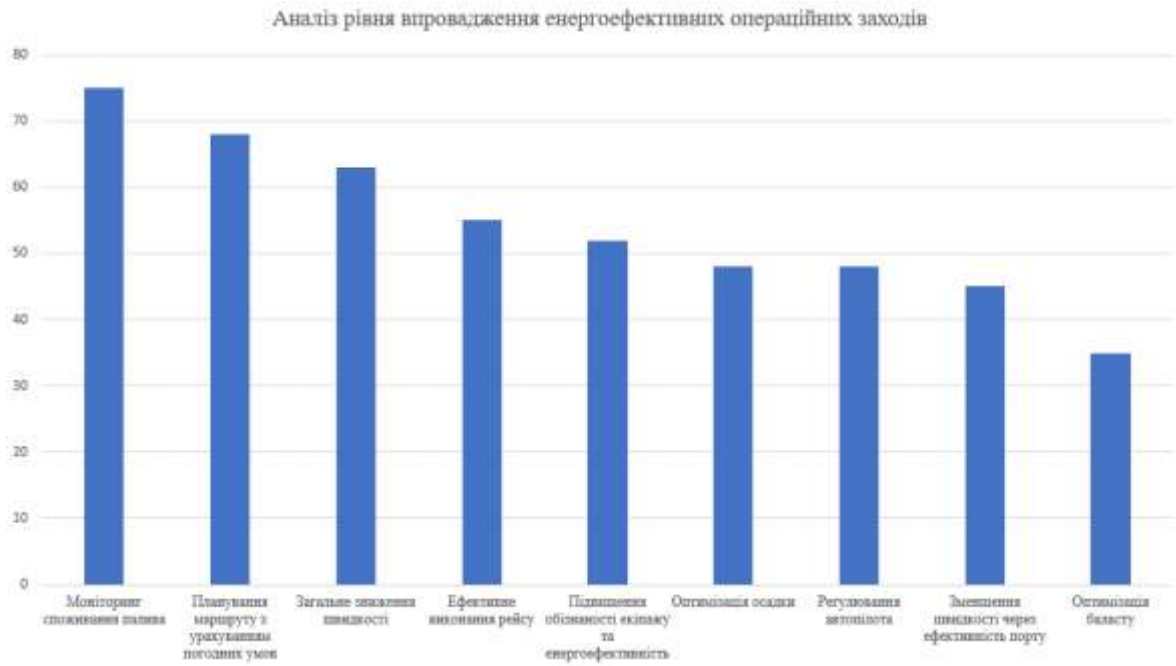


Рисунок 1.4 – Фактори, що впливають на побудову маршруту з урахуванням метеоумов [88]

Побудова маршруту з урахуванням погодних умов дозволяє економити від 1% до 5% палива, а оптимізація рейсу може дати зменшення від 1% до 10% вуглекислого газу на тонно-милю [88]. Цифри, надані постачальниками послуг метеорологічної маршрутизації, можуть бути більш оптимістичними. Сервіс, який надає ClassNK-NAPA GREEN, може досягти зниження на 10% витрат на паливо і заощадження від оптимізації швидкості від 2% до 4% та маршруту від 6% до 8% [12]. Але у певних ситуаціях вплив погодних маршрутів може бути суттєвим. Так, у січні 2014 року був запланований маршрут зі східної Англії до Мексиканської затоки через Ла-Манш, де був центр шторму з висотою хвиль до 20 метрів. Рекомендований маршрут на північ від Шотландії був довшим, але на 15% знизив споживання палива завдяки уникненню цих високих хвиль. Подібним чином, 15,5% витрат на паливо було заощаджено під час подорожі з Карибського басейну до Балтійського моря в березні 2015 року [47, 48].

У дослідженні [4] розглядається проблема оптимізації морських маршрутів за допомогою динамічного планування. Метод припускає коригування маршруту судна в реальному часі, враховуючи рух інших суден. Це досягається завдяки обміну інформацією між суднами, що дозволяє їм уникати заторів, скорочувати час рейсу та економити паливо. Такий підхід, який можна назвати "зеленим судноплавством", дозволяє знизити негативний вплив на довкілля, не шкодячи при цьому ефективності перевезень.

Робота [94] досліджує оптимізацію морських маршрутів, що поєднує переваги кількох алгоритмів. Дані автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) складають детальну цифрову модель морського середовища. На її основі розроблено алгоритм планування маршруту, який поєднує точність ефективного алгоритму пошуку оптимального шляху  $A^*$  й ефективність алгоритму мурашиних колоній. Згладжування отриманого маршруту та забезпечення його відповідності реальним умовам навігації забезпечує метод кривих Безье. За результатами проведених експериментів встановлено, що у порівнянні з існуючими методами новий алгоритм пропонує коротші

маршрути в більш короткі терміни.

У дослідженні [60] запропоновано метод зворотної оптимізації для визначення оптимальних вагових коефіцієнтів, які відображають різноманітні фактори, наприклад безпеку, час у рейсі та економічну ефективність. Суть методу полягає у такому. Спочатку визначено набір "еталонних маршрутів", які відповідають найкращим практикам і враховують думки експертів. Потім, використовуючи умови Каруша-Куна-Таккера, формулюється обернена задача оптимізації. Її метою є визначення вагових коефіцієнтів, що максимально наближають отримані за допомогою оптимізаційної моделі маршрути до еталонних. Запропонований підхід враховує певні фактори безпеки, такі як динамічна остійність судна та ризик зіткнення. Результати дослідження підтверджують здатність запропонованого методу знаходити оптимальні рішення у складних умовах.

У роботі [19] розглядається проблема ефективного управління морським простором при зростаючій інтенсивності морського судноплавства. Для підвищення безпеки навігації та ефективності використання морських ресурсів інтегровані дані АІС з методами морського просторового планування (МПП). Для візуалізації великих обсягів даних Розроблено спеціальний конвеєр обробки великих даних АІС, коли необроблені дані перетворюються в інформативні візуалізації маршрутів суден. Ефективність підходу підтверджена обробкою 90 мільйонів реальних даних за один місяць.

У роботі [73] розглядається традиційне ручне планування морських маршрутів з його трудомісткістю та низькими точністю й оперативністю. Пропонується об'єднати в одному підході використання великих даних (ICOAD), сучасних методів машинного навчання та алгоритмів A\*. Таке комплексне рішення дозволяє автоматизувати процес планування маршрутів, підвищити його точність та адаптивність до мінливих умов плавання.

У дослідженні [31] розглядається проблема оптимізації морських маршрутів з урахуванням безпеки не тільки окремого судна, а й судноплавства в цілому. Пропонований підхід поєднує переваги алгоритмів

імовірнісної дорожньої карти (PRM) та випадкового швидко досліджуваного дерева (RRT\*) для ефективного планування безпечних маршрутів.

У роботі [44] морське середовище моделюється представленням у вигляді бінарного зображення для врахування різноманітних перешкод. Запропонований алгоритм передбачає створення початкового маршруту, що задовольняє основним вимогам, за допомогою алгоритму PRM. Далі для обмеження простору можливих варіантів маршрутів при пошуку оптимального розглядається багатоеліптична область. Алгоритм RRT\* дозволяє детально дослідити обмежену область і знайти оптимальний з точки зору довжини та безпеки маршрут. Для отримання більш гладкого маршруту використовується алгоритм побудови безколізійного просторового графа. Результати моделювання демонструють, що запропонований підхід дозволяє значно скоротити довжину маршруту і час розрахунку порівняно з традиційними методами.

У дослідженні [9] представлено інтегровану модель щодо оптимізації морських перевезень за рахунок одночасної оптимізації курсу та швидкості судна з метою забезпечення безпеки та енергоефективності, а саме:

- динамічну модель морського середовища, що враховує метеорологічні та океанографічні дані, а також обмеження судноплавства;
- моделі штучних нейронних мереж для точного прогнозування витрат палива та обертів двигуна на основі даних попередніх рейсів;
- модель одночасної оптимізації курсу та швидкості для знаходження оптимального рішення з урахуванням безпеки, економічності та часу прибуття;
- алгоритм  $A^*$  для ефективного пошуку оптимального маршруту в симульованому середовищі.

За результатами симуляцій досягнуто значне зниження витрат палива при забезпеченні заданого часу прибуття і високого рівня безпеки плавання.

Дослідження [98] всебічно аналізує безпеку судноплавства. На основі визначених станів безпеки судноплавства побудована математична модель,

що описує зміну цих станів у часі за допомогою однорідної марковської моделі з дискретним часом та станом. Запропонована модель дозволяє визначити найімовірніші сценарії розвитку подій та розробити проактивні заходи для забезпечення безпечної експлуатації судна.

Публікації [98, 112, 114, 117, 138] аналізують стратегії формування навігаційного простору на водних шляхах України, Європи та інших регіонів з урахуванням міжнародних стандартів (ІМО, ЄЕК, ООН) і специфіки різних водних артерій.

Роботи [2, 3, 27, 28, 32] зосереджені на підвищенні точності судноплавства в складних умовах за допомогою сучасних навігаційних систем. У дослідженнях розглянуті методи оцінки безпеки судноплавства шляхом аналізу статистичних даних про похибки навігаційних вимірювань.

Стаття [113] описує модель оцінки ризику аварій для визначення рівня безпеки судноплавства. Роботи [15, 33, 34, 85, 89] присвячені розробці кількісних методів оцінки безпеки судноплавства в умовах обмеженого водного простору. Дослідження [23, 26] пов'язані із забезпеченням безпеки судноплавства, у т. ч. оцінкою навігаційної безпеки, керованості суден та підготовкою екіпажів.

#### 1.4 Постановка завдання наукового дослідження з підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу

Судноплавство – це складна система взаємодій, що містить у собі множину елементів (судна, навколишнє середовище, судноводії, берегові служби) [111]. Тому, безпека судноплавства – це комплексне поняття, що охоплює всі аспекти морської діяльності, від стану судна до збереження навколишнього середовища (рис. 1.5.)

Безпека судна відноситься до його технічного стану, обладнання, екіпажу та процедур, які забезпечують безпечну експлуатацію судна.

Безпека морського середовища пов'язана із захистом морського середовища від забруднення, пошкодження та інших негативних впливів.

Безпека судноплавних шляхів стосується безпеки руху суден, у т. ч. навігації, попередження зіткнень, забезпечення безпеки в портах та на рейдах.

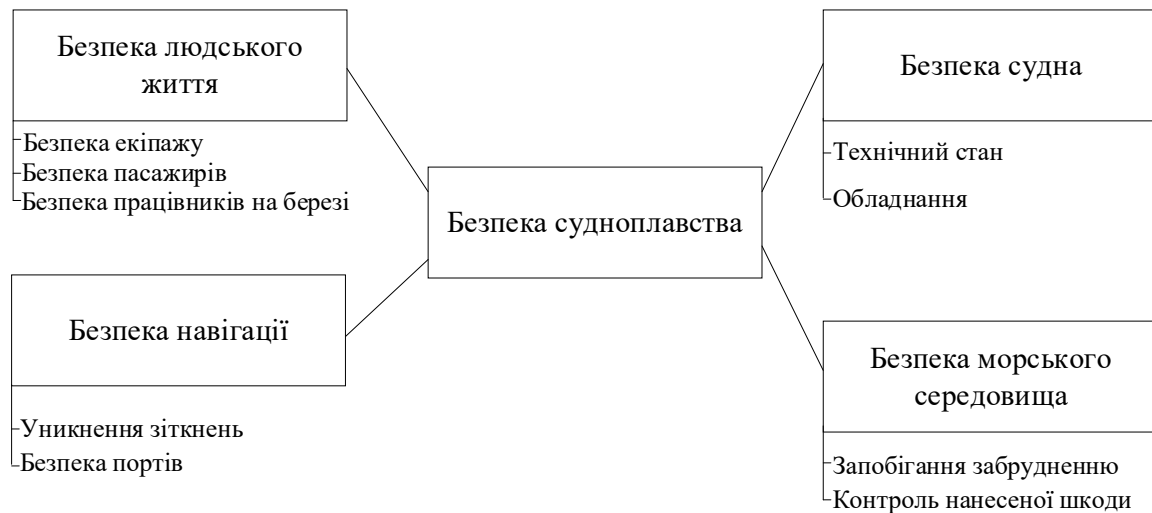


Рисунок 1.5 – Складові безпеки судноплавства

Безпека людського життя спрямована на забезпечення безпеки екіпажу та пасажирів судна, а також людей, які працюють на березі та пов'язані з морською діяльністю.

Структуру безпеки судна наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Безпека судна як багатокomпонентне поняття

Технічна безпека – безпека судна як технічної системи охоплює технічний стан судна, його обладнання, системи безпеки та відповідність усім необхідним стандартам.

Навігаційна безпека – безпека судна як керованого рухомого об'єкта складається з питань навігації, попередження зіткнень, безпечного маневрування та орієнтації на водних просторах.

Ергономічна безпека – безпека взаємодії людини і машини пов'язана з організацією робочих місць, зручністю управління суднами, мінімізацією фізичного та психологічного навантаження на екіпаж.

Технологічна безпека – безпека виду діяльності, для якого судно призначене та враховує специфіку вантажу, технологічні процеси, пов'язані з його перевезенням, та інші фактори, що впливають на безпеку.

З рис. 1.6 видно, що на безпеку судна накладається велика кількість обмежень за маневреними та технічними параметрами судна, за параметрами навігаційної обстановки та функціонування системи «судноводій-судно-навігаційна обстановка». Ці обмеження визначають безпечні зони для руху судна на даному етапі маршруту та режимі роботи судна, що змінює свої межі в процесі переходу. Для постановки завдання наукового дослідження з підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу задамо поточний стан навігаційної безпеки судна багатозначним вектором:

$$\langle X, U, Nav, Conf \rangle, \quad (1.1)$$

де  $X = x_i(t) = \langle x_{t_s}^s, x_{t_1}^1, x_{t_2}^2, \dots, x_{t_d}^d \rangle$  – вектор координат точок маршруту переходу судна у відповідний момент часу переходу;

$U = u_i(t) = \langle u_{t_s}^s, u_{t_1}^1, u_{t_2}^2, \dots, u_{t_d}^d \rangle$  – вектор управлінських впливів на судно у відповідний момент часу переходу;

$Nav = n_i(t) = \langle n_{t_s}^s, n_{t_1}^1, n_{t_2}^2, \dots, n_{t_d}^d \rangle$  – вектор прогнозованого стану навігаційної

обстановки в районі точок маршруту у відповідний момент часу переходу;

$Con = c_i(t) = \langle c_{t_s}^s, c_{t_1}^1, c_{t_2}^2, \dots, c_{t_d}^d \rangle$  – вектор обмежень, що накладаються на рух

судна в районі точок маршруту у відповідний момент часу переходу.

Необхідно на відрізку часу  $\Delta t = [t_s, t_d]$  за відповідним критерієм навігаційної безпеки  $K_{saf}$  визначити варіанти руху та режими роботи судна:

$$K_{saf} = \int_{t_s}^{t_d} f(X, U, Nav, Con) dt \rightarrow \max, \quad (1.2)$$

де  $f(X, U, Nav, Con)$  – функція, що визначає стан навігаційної безпеки;

$t_s, t_d$  – час початковий та кінцевий час переходу.

Розв'язання цієї задачі в загальному виді ускладнене наявністю складних та нелінійних залежностей між елементами системи «судноводій-судно-навігаційна обстановка». Для знаходження оптимального плану, що враховує критерії безпеки й енергоефективності, можливості судна, та стан навігаційної обстановки необхідно виконати перебір усіх варіантів. Тому доцільно виконати декомпозицію цього завдання на часткові завдання.

Планом переходу судна назвемо вектор:

$$pl = \langle X, U \rangle, \quad (1.3)$$

де  $X = x_i(t) \in X^{safe}(Nav)$  – вектор координат судна, що належать до області безпечних точок за відповідної навігаційної обстановки.

$U = u_i(t) \notin U(Con)$  – вектор управлінських впливів, що не належать до області обмежень.

Відповідно до заданого визначення, в області простору між початковою та кінцевою точками маршруту існує деяка множина варіантів плану переходу:

$$PL = \{pl_1, pl_2, \dots, pl_n\}. \quad (1.4)$$

Перше часткове завдання полягає в тому, щоб в існуючій множині  $PL$  знайти план  $pl_i$ , що мінімізує час виконання плану  $T(pl_i)$ :

$$T(pl_i) \rightarrow \min. \quad (1.5)$$

Для запобігання виникнення небезпечних навігаційних ситуацій, пов'язаних із забезпеченням безпеки плавання, судноводій має бути забезпечений інформацією, яку можна представити [71]:

$$I = (I_{apr}, I_{cur}), \quad (1.6)$$

де  $I_{apr}$  – апіорна інформація про елементи вектору  $\langle X, U, Nav, Conf \rangle$ ;

$I_{cur}$  – поточна інформація, що отримує судноводій в процесі діяльності про елементи вектору  $\langle X, U, Nav, Conf \rangle$ .

Проте, судноводії стикаються з відсутністю актуальних даних про погодні умови, течії, глибини та інші елементи вектору  $\langle X, U, Nav, Conf \rangle$ , що можуть вплинути на безпеку переходу. Тому обґрунтований вибір складових  $I_{apr}$  та  $I_{cur}$  з урахуванням їхньої взаємопов'язаності є одним зі способів одночасного підвищення як економічної ефективності та навігаційної безпеки плавання. Граничну величину ефективності та безпеки можна представити як величину максимальної обґрунтованості прийняття рішення  $K_{об}^k \rightarrow \max :$

$$K_{об}^k(I_{apr}, I_{cur}) \rightarrow \max. \quad (1.7)$$

Методика досліджень для вирішення поставленого завдання базується на вирішенні часткових завдань та логічної послідовності їх виконання, а також обраних методах досліджень та їх співвіднесенні із завданнями окремих етапів. Завдання дослідження вирішуються в 4 етапи.

На першому етапі необхідно провести удосконалення моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу. Під час якого виконується визначення загальних вимог, обмежень та припущень до моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу. На основі визначених даних удосконалюється математична модель району плавання для оптимального маршруту переходу судна та моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден. Це дозволить розробити апарат формалізації навігаційної обстановки, за допомогою якого буде можливо при обробці інформації динамічно додавати нові моделі, використовуючи як постійні, так і змінні часові інтервали. Ієрархічна композиція моделей є фундаментальним підходом для розробки інтелектуальних систем у програмному забезпеченні, що застосовується в навігаційних системах та системах управління суднами. Цей підхід дозволяє реалізувати концепцію e-Navigation, забезпечуючи ефективне планування морських перевезень.

На другому етапі необхідно виконати розробку та удосконалення методів підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу. Даний етап містить удосконалення методу формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, оптимального щодо витрати палива та методу формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, оптимального за часом руху. Удосконалені методи дозволять:

- враховувати нечіткі вхідні дані, що безперервно змінюються в часі (динамічні завдання), значення, які неможливо задати;
- формалізувати критерії оцінки та порівняння;

– проводити якісні оцінки як вхідних даних, так і вихідних результатів: оперування значеннями даних, їх ступенем достовірності та її розподілом;

– враховувати досвід та знання судноводіїв в оцінці якості процесів, що відбуваються, коли неможливо здійснювати точні математичні обчислення.

Третій етап характеризується реалізацією удосконалених методів та моделей в середовищі MatLab для подальшого моделювання. Побудована модель складатиметься з таких елементів:

1. Моделі, що описує навігаційні умови, що впливають на судно (навігаційної обстановки);
2. Моделі руху судна;
3. Моделі маршруту переходу;
4. Моделі, що реалізує метод формування безпечного оптимального маршруту.

На четвертому етапі необхідно провести оцінку ефективності удосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу. Даний етап бути виконаний на основі застосування аналітико-стохастичного підходу та імітаційного моделювання.

#### Висновки за першим розділом

1. Проведений аналіз свідчить про актуальність завдання забезпечення навігаційної безпеки суден при плануванні переходу.

2. Проведений аналіз основних процесів планування переходу суден свідчить про необхідність врахування великої кількості факторів, а саме метеорологічних умов, гідрографічних особливостей району плавання, технічного стану судна, наявності навігаційного обладнання та кваліфікації екіпажу. Визначено ключові етапи процесу планування – збір інформації, аналіз маршрутів, розрахунок елементів руху судна та розробку планів аварійної ситуації.

3. Хоча існуюча система регулювання безпеки мореплавства є досить розвиненою, сучасні умови судноплавства вимагають постійного оновлення та доповнення нормативних документів, особливо з урахуванням впровадження технології e-Navigation.

4. Аналіз результатів наукових досліджень виявив актуальні тенденції в галузі забезпечення навігаційної безпеки – підвищення точності навігаційних вимірювань, створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, розробка ефективних систем управління ризиками. Однак, існують певні невирішені питання, а саме: оцінка впливу антропогенних факторів на безпеку судноплавства та розробка універсальних моделей системи «судно-середовище-судноводій».

5. Сформульовано завдання наукового дослідження, що полягає у розробці та удосконаленні методів рішень для планування безпечного переходу судна. Їхня інтеграція в технологію e-Navigation дозволить враховувати широкий спектр факторів і забезпечити оптимальне планування маршруту, мінімізувати ризики аварійних ситуацій та підвищити ефективність судноплавства.

Основні результати розділу опубліковані у роботах [17, 16, 68, 83, 105, 106]

## РОЗДІЛ 2

### УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ

2.1 Визначення загальних вимог, обмежень та припущень до моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу

Планування переходу – це процес, що складається з великої кількості проблем, що підлягають вирішенню. У той самий час ці проблеми сильно відрізняються залежно від типу судна, маршруту, сезону, типу вантажу тощо. Метою планування переходу в морському судноплаванні є забезпечення безпечного руху судна від пункту відправлення до пункту прибуття відповідно до встановлених критеріїв й обмежень. Основними критеріями безпеки для всіх суден є недопущення посадка на мілину та уникнення зіткнень.

Згідно резолюції А.893 (21) міжнародної морської організації [72], визначені чотири етапи планування переходу судна (рис. 2.1):

- оцінка;
- планування;
- виконання;
- моніторинг.



Рисунок 2.1 – Етапи планування переходу судна

Ретельна розробка плану переходу забезпечує безпеку життя екіпажу та пасажирів на морі, ефективність навігації та захисту морського середовища,

безпеку вантажу.

Для забезпечення навігаційної безпеки суден планування переходу має базуватися на всій наявній інформації, обсяг плану повинен починатися та закінчуватись від "причалу" до "причалу" та мати у своєму складі моніторинг процесу виконання. Судноводій повинен розробити детальну уявну модель переходу судна від початкової до кінцевої точки маршруту перед початком кожного плавання.

Планування переходу судна (рис 2.2) починається з етапу оцінки, який складається зі збору, обробки й аналізу всієї наявної інформації, що стосується переходу.

Після того як інформація зібрана та проведена її оцінка, судноводій переходить до процесу безпосереднього планування переходу.

На етапі виконання судноводію необхідно розглядати план як "гнучкий документ" та переглядати або коригувати його в разі будь-яких особливих обставин, які впливають на безпеку переходу.

Четвертим й останнім етапом планування рейсу є етап моніторингу. Після початку рейсу судноводію слід контролювати рух судна за запланованим маршрутом.

Систематичний процес планування забезпечує розробку детального і відповідного плану переходу, що дозволяє судноводію завчасно реагувати на критичні ситуації та важливі зони у процесі руху судна.

Процес оцінки полягає у зборі, обробці та аналізі всієї інформації, що має відношення до поставленого завдання переходу, включаючи визначення ризиків й оцінку небезпечних областей. Даний процес дозволяє судноводію чітко і точно визначати й окреслювати всі небезпечні зони, в яких можуть виникнути небезпечні ситуації.

Судноводій під час планування переходу враховує такі фактори:

1. Стан судна, його остійність та обладнання, експлуатаційні обмеження, допустима осадка в морі, на фарватерах і в портах, маневрові характеристики судна.

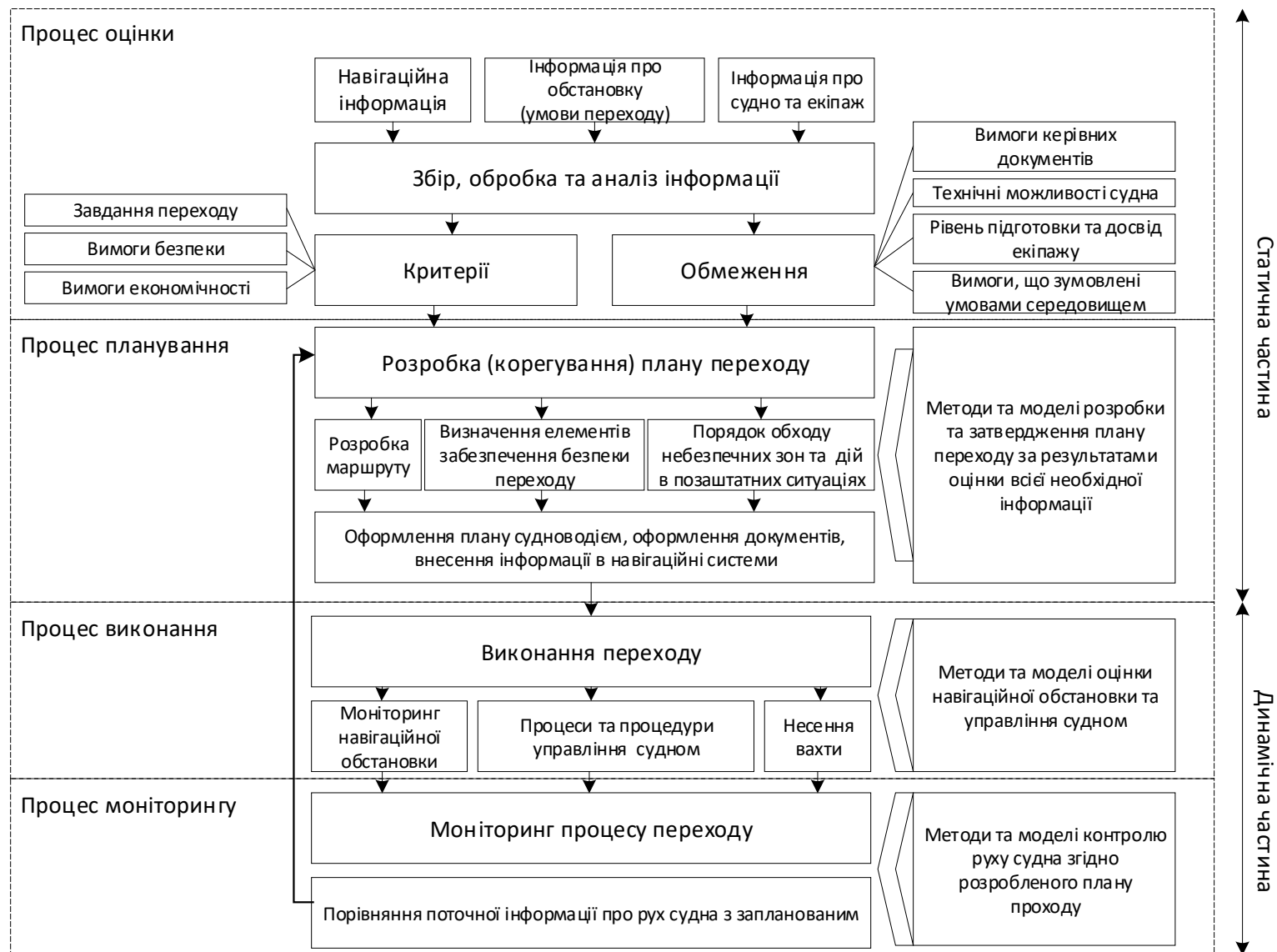


Рисунок 2.2 – Процес планування переходу судна

2. Характеристика вантажу (особливо небезпечного), а також його розподіл, розміщення та кріплення на борту судна.

3. Компетентність та підготовка екіпажу для здійснення переходу.

4. Навігаційні карти, які будуть використовуватися для запланованого переходу, мають бути точними й оновленими та відповідного масштабу.

5. Точні й оновлені маршрути плавання, списки вогнів і списки засобів радіонавігації.

6. Будь-яка відповідна актуальна додаткова інформація, зокрема:

– маршрутні довідники та схеми планування переходу, опубліковані компетентними органами;

– атласи течій та таблиці припливів;

– кліматологічні, гідрографічні й океанографічні дані, а також інша відповідна метеорологічна інформація;

– наявність сервісів для прогнозування погоди;

– існуючі системи маршрутизації та звітності суден, служби руху суден та заходи захисту морського середовища;

– інтенсивність руху, яка може виникнути під час переходу;

– інформація, що стосується лоцманського проведення, посадки та висадки, включаючи обмін інформацією між капітаном і лоцманом (при використанні лоцмана);

– доступна інформація про порт, включаючи інформацію, що стосується наявності берегових механізмів реагування на надзвичайні ситуації й обладнання;

– будь-які додаткові пункти, що стосуються типу судна або його вантажу, конкретних районів, які судно перетинає, і типу рейсу або проходу, який буде здійснено.

Планування переходу складається з таких основних елементів:

1. Розробка маршруту переходу зі вказанням справжнього напрямку запланованого шляху, а також усіх небезпечних зон, існуючих систем маршрутизації суден та звітності, служб руху суден та будь-яких захисних

зон. Маршрут має відповідати встановленим умовам навігаційної обстановки по всій дистанції переходу, включаючи фазу лоцманської проводки, фазу переходу відкритим морем та прохід прибережної акваторії.

2. Основні елементи забезпечення безпеки на морі, ефективності навігації та захисту морського середовища під час запланованого переходу:

- визначення безпечної швидкості на всіх етапах переходу, враховуючи навігаційні небезпеки протягом переходу та характеристики судна;
- точки маршруту, в яких необхідно змінити швидкість руху;
- необхідна мінімальна глибина під кілем у небезпечних зонах;
- точки маршруту, де потрібна зміна статусу судна;
- точки зміни курсу, маневрові характеристики судна на запланованій швидкості;
- метод і частота визначення місцезнаходження судна;
- порядок використання систем маршрутизації та моніторингу навігаційної обстановки, а також служб руху суден;
- заходи щодо захисту морського середовища;
- інструкції на випадок надзвичайних ситуацій, порядок дій у випадку будь-якої надзвичайної ситуації, що потребує відмови від плану;

Дані пункти є обов'язковими, але при плануванні переходу можна враховувати й інші фактори, не обмежуючись викладеними.

У процесі планування судноводій також повинен врахувати:

- погоду: прогноз погоди та її регулярні оновлення дозволяють визначити обмеження на рух судна при переході, що зумовлені несприятливими метеорологічними умовами;
- припливи: припливи та відливи зумовлюють обмеження на рух судна у прибережній акваторії, при вході (виході) з порту та на якірній стоянці;
- обмеження судна: можливості судна та екіпажу мають відповідати вимогам запланованого переходу;
- навігаційні небезпеки: судноводій має визначити навігаційні небезпеки, з якими він може зіткнутися під час переходу;

– план на випадок надзвичайних ситуацій: судноводій повинен мати чітко визначений порядок дій для запобігання та усунення наслідків виникнення надзвичайної ситуації.

Процес виконання плану полягає у безперервній перевірці відповідності поточних параметрів руху судна з планом переходу.

Під час виконання плану враховуються такі фактори:

1. Надійність і стан навігаційного обладнання судна.
2. Розрахунковий час прибуття у визначені точки маршруту.
3. Метеорологічні умови.
4. Порівняння денного та нічного проходження небезпечних зон.
5. Умови руху, особливо в зонах навігаційних небезпек.

Моніторинг виконується протягом усього переходу для контролю судна щодо його знаходження на безпечній відстані від будь-яких навігаційних небезпек. Безперервний моніторинг руху судна згідно до спланованого графіку дозволяє підвищити рівень безпеки переходу. Після завершення складання плану переходу судноводій розраховує приблизний час до критичних точок маршруту та визначає тактику їх проходження.

Планування переходу судноводієм базується на стандартних принципах:

1. Забезпечення безпеки руху судна, життя та здоров'я екіпажу та пасажирів – це фундаментальна функція процесу планування переходу, на якій має концентруватися основна увага судноводія.

2. Контроль ризиків, що дозволяє судноводієві наперед визначати ризики і краще контролювати безпеку навігації.

3. Постійна готовність до реагування на позаштатні ситуації, більшість з яких, але не всі, судноводій враховує у процесі планування переходу судна.

4. Моделювання судноводієм проходження судном маршруту, що відповідає розробленому плану, для виявлення і розуміння всіх можливих небезпечних ситуацій та відпрацювання адекватних рішень для їх подолання.

5. Використання судноводієм при плануванні всієї наявної інформації

та досвіду для забезпечення безпеки на морі.

6 Гнучкість плану, що передбачає адаптацію до змін навігаційної обстановки та прийняття необхідних рішень при виникненні позаштатної ситуації у ході виконання переходу.

7. Урахування особливих характеристик самого судна (осадка, маневреність, циркуляція, технічний стан, кількість екіпажу тощо).

8. Використання судноводієм понять достовірності, правдоподібності, порівняння та затримки проходження інформації для мінімізації ризиків. Судноводій повинен ставити під сумнів цілісність інформації, яка використовується під час планування переходу та навігації, особливо стосовно розрахунку поточних координат судна та глибину під кілем (УКС).

Даний підхід може застосовуватися до планування переходу судна будь-якого типу, що дозволяє запобігти виникненню небезпечних ситуацій, викликаних людським фактором.

Проте, навігаційні помилки, викликані людським фактором, і досі залишаються основними причинами в інцидентах та подіях на морі [125]. Тому існує потреба в засобах підтримки прийняття рішення (СППР) судноводія для забезпечення безпеки морської навігації шляхом зменшення кількості помилок у процесі планування переходу. Застосування нових технологій, таких як система автоматичної ідентифікації (AIS), електронна карта та інформаційна система (ECDIS), інтегровані системи ходового містка та навігації, автоматичні засоби радіолокаційного визначення (ARPA), системи ідентифікації та відстеження на великі відстані (LRIT), служби руху суден (VTS) і глобальна морська система безпеки в разі лиха (GMDSS) дозволяють значно підвищити рівень безпеки під час руху судна [2, 36, 37, 58].

Цілісний і систематичний підхід використання навігаційних, зокрема електронних, інструментів складає основу електронної навігації (e-Navigation). IALA (Міжнародна асоціація морських засобів навігації та маякових органів) визначає e-Navigation як гармонізований збір, інтеграцію, обмін, подання та

аналіз навігаційної інформації між судном та береговими службами за допомогою електронних засобів для покращення навігації від пункту відправлення до пункту прибуття та супутніх послуг для забезпечення безпеки на морі та захисту морського середовища [56-59, 115].

Впровадження e-Navigation [115] передбачає розробку бортових навігаційних систем, які об'єднують усі відповідні джерела інформації судна та допоміжну інформацію. E-Navigation може поєднувати планування переходу з динамічним моніторингом у реальному часі для гарантування підтримання заздалегідь запланованої глибини під кілем протягом усього плавання. Крім того, за маршрутом судна можна аналізувати навігаційну обстановку в режимі реального часу. Система може мати вбудовану СППР для допомоги судноводіям у процесі планування переходу та управління рухом судна.

Реалізація e-Navigation у судноплаванні досягається виконанням таких вимог щодо бортових, берегових і комунікаційних елементів:

1. На борту судна в інтегрованих навігаційних системах має комплексуватися інформація від судових і берегових джерел та дані від інших суден у районі плавання судна. Для цього організується стандартний інтерфейс користувача та комплексної системи керування охоронними зонами та оповіщеннями.

2. У берегових службах для покращення управління рухом суден та супутніми послугами з берега здійснюються заходи щодо інтелектуалізації координації та обміну вичерпними даними у стандартизованих форматах для підтримки безпеки та ефективності суден.

3. Комунікаційна інфраструктура забезпечить автоматизовану безперебійну передачу інформації на борту судна, між суднами, між судном і береговою службою, а також між береговими службами.

Забезпечення виконання поставлених цілей впровадження e-Navigation досягається виконанням таких погоджених кроків з боку ІМО:

а) покращення, гармонізація та зручна конструкція ходового містка;

- б) створення засобів стандартизованої автоматичної звітності;
- в) підвищення надійності, стійкості та цілісності обладнання ходового містка та навігаційної інформації;
- г) інтеграція та подання на графічних дисплеях наявної інформації, отриманої через комунікаційне обладнання;
- д) покращення комунікації з VTS.

Досвід автоматичної маршрутизації на відстані кількох сотень морських миль за допомогою спеціального програмного забезпечення показує, що наявність неточних вимірювань маршруту призводить до значних затримок. Але досі на теперішній час у процесі планування розрахунок маршруту в основному судноводій виконує особисто.

Прогрес у сфері e-Navigation не зміг привернути серйозної уваги до автоматичного планування переходу. Основною причиною такого стану справ стало фактичне ототожнення у компаніях, які досліджують автономні рішення, морської навігації й автономної автомобільної навігації. В останньому випадку розглядався автомобіль, що мав рухатися дорогою або автомагістраллю по смугах. Тому в рамках концепції e-Navigation розпочали розробку системи e-Voyage для планування переходу суден. Але практична реалізація системи e-Voyage ускладнюється тим, що комплексне розв'язання задачі маршрутизації передбачає поєднання кількох предметних областей:

- геоінформаційний компонент – інструменти моніторингу і прогнозування динаміки навігаційної обстановки в районі плавання протягом всього часу аналізованого рейсу;
- технологічний компонент – модель руху судна в різних умовах навігаційної обстановки, яка враховує технічні можливості судна;
- економічний компонент – критерії та обмеження розв'язуваної задачі оптимізації;
- математичний компонент – застосування математичних методів й алгоритмів пошуку оптимального маршруту за вибраними критеріями з урахуванням заданих обмежень.



## 2.2 Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна

У процесі оцінки району плавання та підходів до портів судноводій повинен усвідомити:

- правила плавання у цьому районі;
- навігаційно-гідрографічні особливості району: рекомендовані шляхи та маршрути, фарватери та канали, довжину та ширину їх колін; небезпечні, заборонені та обмежені для плавання райони, райони інтенсивного руху суден та поромів, лову риби, розвідки та видобутку нафти та газу; системи поділу руху суден; місця можливих якірних стоянок та його характеристики;
- забезпеченість району плавання засобами навігаційного обладнання, їх режими роботи та обмеження використання; можливості застосування радіолокаційних засобів (РЛЗ) визначення місця судна; характерні ознаки для впізнання навігаційних орієнтирів та запобіжних знаків;
- основні (глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) та резервні (візуальні та радіолокаційні) способи та необхідну дискретність обсервацій;
- зони дії, види обслуговування систем управління рухом суден;
- гідрологічні особливості: припливно-відливні явища; швидкість та напрямок течії; характер та ступінь вітрового хвилювання; опрісненість води; вплив цих факторів на допустиме осадження та швидкість судна при проходженні ним найбільш мілководних ділянок та ін.

Розробка оптимального маршруту переходу судна передбачає повний аналіз всіх етапів переходу, що вимагає значних ресурсів для перебору великої кількості непотрібних елементів (множини "хибних" маршрутів, урахування інших факторів для оптимізації для забезпечення безпеки плавання). Практика судноводіння показує, що пошук оптимальної траєкторії руху судна слід поділити на рівні ієрархії, на яких застосовуються моделі навколишнього простору та руху різного ступеня абстракції. При цьому

ступінь деталізації моделі руху має відповідати деталізації моделі району плавання, а евристичні та багатоетапні підходи мають передбачати сумісність результатів на кожному етапі планування.

У роботі [100] розглядаються різні методи пошуку та прокладання маршрутів руху рухомих об'єктів:

1. У формалізованому, нечітко заданому, неформалізованому районі плавання.
2. Методи, в яких накопичується та не накопичується інформація про район плавання.
3. Глобальні та локальні.
4. Адаптивні та неадаптивні.

Використання у загальному випадку будь-якого з методів може виявитися недостатнім для вибору оптимального маршруту судна. Доцільно спільне застосування різних за властивостями алгоритмів залежно від етапу побудови маршруту та рівня деталізації району плавання (*MR*).

Подібний підхід дозволяє використовувати переваги та компенсувати недоліки різних моделей та алгоритмів, задовольнити різним критеріям оптимальності, зменшити вимоги до обсягів ресурсів для переробки інформації, забезпечити її цілеспрямоване накопичення та збереження для конструювання баз знань навігаційної обстановки [79, 93, 22].

У дослідженнях [50, 99] виділяються типові рівні знань людини про навігаційний простір при плануванні руху рухомих об'єктів: сенсомоторні, керуючі, каузальні, топологічні, метричні, реляційні тощо. Тому сучасна модель простору функціонування рухомих об'єктів матиме складну ієрархічну структуру [110], яка для цілей судноводіння містить такі елементи:

- інтегровані інформаційні поля однорідних даних про простір;
- структурні елементи простору та логіка їх взаємозв'язків;
- закономірності загального та локального характеру.

Для вибору маршруту переходу та забезпечення безпеки плавання

судна з використанням автоматизованих навігаційних комплексів із системи інформаційного простору (СІП) має бути формалізована математична модель навігаційно-гідрографічної обстановки. Її основу складатиме цілеспрямована систематизація, сформульована у керівних документах. Крім того, мають бути встановлені принципи взаємодії елементів, пов'язані з мореплаванням. У дослідженні [147] подібні моделі будуються на принципах та методах традиційного судноводіння, пов'язаних з поділом маршруту переходу по характерних районах з умовами плавання, що відрізняються.

На стратегічному рівні планування пропонується виділяти два характерні типи інформації ( $I^{MR}$ ) про район плавання ( $MR$ ), в якому буде здійснюватися перехід судна:

$$I^{MR} = \{WS, LS\}, \quad (2.1)$$

де  $WS \in (ws_1, ws_2, \dots, ws_j)$  – тип району водного простору:

- район океану ( $OcR$ );
- морські райони ( $SR$ );
- протоки ( $DT$ );
- бухти ( $BT$ );
- затоки ( $BS$ );
- річки ( $RV$ );

$LS \in (ls_1, ls_2, \dots, ls_n)$  – район суші, до якого може відноситися:

- материк ( $MT$ )
- острів ( $ISL$ )
- півострів ( $PISL$ ), порти, хвилеломи, причали та ін.

Район водного простору можна задати множиною точок:

$$ws_n \in (Cord_n^{ws}, af_n^{ws}), \quad (2.2)$$

де  $Cord_n^{ws} \in (x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n, d_1 \dots d_i)$  – значення координат  $(x, y)$  та глибини  $(d)$  в точці що належить  $ws_n$ ;

$af_n^{ws}$  – приналежність району одному з типів району плавання.

Район суші можна задати множиною точок:

$$ls_n \in (Cord_n^{ls}, af_n^{ls}), \quad (2.3)$$

де  $Cord_n^{ls} \in (x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n)$  – значення координат  $(x, y)$  в точці, що належить  $ls_n$  ;

$af_n^{ls}$  – відношення району суші до  $\{MT, ISL, PISL\}$ .

Взаємозв'язок між типовими районами водних просторів за маршрутом переходу судна, особливостями судноплавства в цих районах та експлуатаційними характеристиками судна визначають рекомендовані шляхи переходу. Деталізацію характеристик умов плавання судна можна подати як типові групи, що враховують встановлені шляхи, види діяльності та обмеження (рис. 2.3).

Згідно рис. 2.3, район плавання, в якому здійснюється перехід судна, можна представити множиною рекомендованих шляхів, які можна побудувати та сформулювати універсальне представлення:

$$MR = \sum_1^n W_i^{rec}, \quad (2.4)$$

де  $W_i^{rec}$  –  $i$ -ий рекомендований шлях.

У свою чергу,  $W_i^{rec}$  можна описати:

$$W^{rec} = \left\{ Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}, wid^{W^{rec}} \right\}, \quad (2.5)$$

де  $Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}$  – координати початкового, кінцевого та

проміжних (поворотних) пунктів шляху;

$wid^{rec}$  – ширина шляху.



Рисунок 2.3 – Взаємозв’язок між типовими районами водних просторів за маршрутом переходу судна, особливостями судноплавства в цих районах та експлуатаційними характеристиками судна

Проте відомі операції над множинами для формування математичної моделі району плавання не в повній мірі можуть описати всі процеси, що ставить під сумнів доцільність їх безпосереднього використання в алгоритмах планування переходу. Це зумовлено тим, що процес планування переходу в системі e-Navigation розглядається як завдання підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, проте регламентованих правилами, прописаними у відповідних керівних документів. Тому для розрахунку оптимального маршруту переходу суден пропонується при побудові математичної моделі району плавання застосувати математичний апарат нечітких множин.

Таким чином, райони плавання, їх суміжність (можливість переходу), рекомендовані шляхи, інші елементи, необхідні для планування маршруту руху судна, можна представити комбінаціями логічних операцій над нечіткими множинами та їх взаємодій:

$$W_i^{rec} = \left\{ \begin{array}{l} \min \left( \bar{\mu}_{rest} (Cord_1^{ws}), \left( \min \left( \mu_{ws_1} (Cord_1^{ws}) \right) \left( 1 - \mu_{cond} (Cord_1^{ws}) / Ex_{wessel} \right) \right) \right) \\ \min \left( \bar{\mu}_{rest} (Cord_2^{ws}), \left( \min \left( \mu_{ws_2} (Cord_2^{ws}) \right) \left( 1 - \mu_{cond} (Cord_2^{ws}) / Ex_{wessel} \right) \right) \right) \\ \dots \\ \min \left( \bar{\mu}_{rest} (Cord_j^{ws}), \left( \min \left( \mu_{ws_j} (Cord_j^{ws}) \right) \left( 1 - \mu_{cond} (Cord_j^{ws}) / Ex_{wessel} \right) \right) \right) \end{array} \right\}, \quad (2.6)$$

де  $\bar{\mu}_{rest_j} (Cord_j^{ws})$  – функція приналежності координат  $j$ -го району плавання до множини районів обмеження плавання (rest);

$\mu_{ws_j} (Cord_j^{ws})$  – функція приналежності координат  $Cord_j^{ws}$  до  $j$ -го району плавання ( $ws_j$ );

$\mu_{cond} (Cord_j^{ws}) / Ex_{wessel}$  – функція приналежності координат  $Cord_j^{ws}$  до  $j$ -го району плавання до множини районів, умови плавання (cond) в яких не відповідають експлуатаційним характеристикам судна ( $Ex_{wessel}$ ).

Від обраного кроку дискретизації залежить точність та інформативність моделі району плавання. Аналіз позитивної морської практики показує, що значення радіусу (якщо вибирається домен безпеки у вигляді кола) зони навігаційної безпеки судна ( $Z_{nsft}$ ) з урахуванням мінімального навігаційного запасу може застосовуватись як крок дискретизації вибору координат ( $Cord_j^{ws}$ ).

Під час пошуку маршруту потрібно оцінювати близькість судна до небезпек (рис. 2.4).

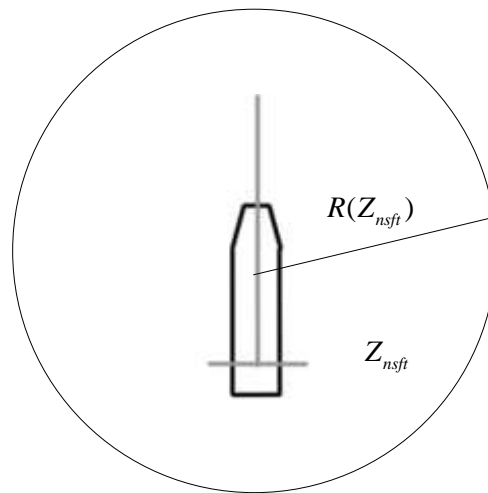


Рисунок 2.4 – Оцінювання близькості судна до небезпеки

На основі аналізу поточних координат  $ws_j$  визначається їх відповідність району плавання, можливості проходу даної точки судном та відповідність умов плавання експлуатаційним характеристикам судна. Нові координати для переміщення рухомого об'єкта  $(x_{j+1}, y_{j+1})$  визначаються так:

$$\begin{cases} x_{j+1} = x_j + R(Z_{nsft}) \cdot \cos(h) \\ y_{j+1} = y_j + R(Z_{nsft}) \cdot \sin(h) \end{cases} \quad (2.7)$$

де  $x_{j+1}, y_{j+1}$  – координати пункту рекомендованого шляху;

$x_j, y_j$  – координати поточного пункту рекомендованого шляху.

Розроблена модель формалізує процес визначення рекомендованих шляхів як основи району плавання для побудови оптимального маршруту переходу суден. Дана модель дозволяє забезпечити:

- формалізацію процесу оцінки району плавання при плануванні переходу судна в умовах невизначеності;
- врахування у процесі оцінки обстановки більшої кількості параметрів;
- виконання ієрархічного нечіткого логічного виведення.

### 2.3 Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден

Інтенсифікація судноплавства на світових морських шляхах робить актуальним розвиток інтелектуальних сервісів, спрямованих на підвищення ефективності морських перевезень і зниження ризиків експлуатації суден. Одним з найбільш важливих завдань у цій сфері є вироблення відповідних рішень для автоматичного корегування (зміни) плану переходу судна в динамічних умовах зміни навігаційної обстановки. Важливою особливістю вирішення даного завдання є врахування того факту, що робота судноводія протікає в режимі реального часу. Дана особливість накладає жорсткі часові обмеження на процеси вироблення та прийняття рішень і вимагає побудови сценаріїв запобігання ситуацій, що можуть знизити рівень безпеки переходу. Зазначені обставини зумовлюють необхідність розробки адекватних до вимог МППЗС-72 математичних моделей, придатних для опису ситуації, що склалася в даний момент, та прийняття рішень з управління судном у реальному часі в умовах динамічної навігаційної обстановки.

Аналіз сучасних підходів щодо побудови математичних моделей навігаційної обстановки [5, 8, 10, 11, 14, 21, 38, 41, 43, 46, 49, 52, 61, 63, 75-77, 81, 96, 123, 109, 119] для планування маршруту судна показує, що в них є низка суттєвих недоліків:

- 1) невизначеність співвідношення району плавання та гарантованого маршруту судна;
- 2) суб'єктивний характер цільової функції переходу;
- 3) можливий пропуск навігаційних небезпек при неповному аналізі району плавання;
- 4) можливе перекриття зон навігаційної безпеки руху судна, побудованих навколо зон навігаційних небезпек, що закриває доступні проходи між ними;

5) неповне або часткове врахування правових обмежень документів, що регламентують рух та безпеку на морі.

Аналіз розглянутих недоліків свідчить, що у теперішній час використовувані для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден математичні моделі навігаційної обстановки не в змозі комплексно врахувати всі фактори впливу.

Комплексне вирішення завдання планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу вимагає суворій відповідності математичної моделі навігаційної обстановки реальним умовам змінюваного навколишнього середовища та об'єктів. У цьому зв'язку завдання планування маршруту має у своєму складі мати такі основні елементи:

- геоінформаційний, тобто моделі моніторингу та прогнозування динаміки зміни навігаційної обстановки в районі плавання протягом всього часу його проходження;

- технологічний, тобто модель руху судна, яка враховує експлуатаційні можливості судна;

- економічний, критерії й обмеження вирішуваного завдання, які представлені універсальними виразами.

До математичної моделі навігаційної обстановки висуваються вимоги:

- рух суден у районі плавання розглядається як цілеспрямована дія осіб, метою якої на основі аналізу поточної навігаційної обстановки є запобігання зіткненню з навігаційними перешкодами, використовуючи основні правила, наведені у COLREGs;

- врахування динамічних моделей руху суден при використанні сценарного підходу для прогнозування процесу розвитку навігаційної обстановки;

- опис реального процесу переходу судна як складної групової взаємодії окремих елементарних одиниць;

- розумне обмеження кількості можливих сценаріїв розвитку

навігаційної обстановки на основі обмежень COLREGs і динаміки змін ключових параметрів руху суден (ліній відносного руху, пеленгів і швидкостей).

Навігаційна обстановка безперервно змінюється у часі. Враховуючи динаміку процесу, до моделі застосовуються такі основні припущення [18]:

- постійний вплив змін навігаційної обстановки на модельовані об'єкти;
- велика кількість об'єктів моделювання суттєво ускладнює опис руху кожного судна з використанням системи диференціальних рівнянь;
- незалежність стану моделі судна у кожний момент часу від гідродинамічних факторів, що впливають на нього;
- стохастичний характер зміни ситуацій навігаційної обстановки.

Математична модель навігаційної обстановки застосовується на третьому (виконання) та четвертому (моніторинг) етапі планування. Отже, можна припустити, що забезпечення безпеки руху судна досягається визначенням ситуації, що складається при даних значеннях навігаційної обстановки.

У загальному вигляді навігаційну обстановку  $E^{nav}(t)$  у районі плавання в заданий момент часу можна задати приналежністю до певної навігаційної ситуації  $s_i^{nav}$  з множини  $S^{nav}$ :

$$E^{nav}(t) \in s_i^{nav}, \text{де } s_i^{nav} \in S^{nav}. \quad (2.8)$$

З множини допустимих маршрутів у процесі планування вибирається маршрут з найкращими значеннями показників таких критеріїв якості:

- економічних (витрати палива на перехід судна);
- термінальні (збільшення (зменшення) часу переходу судна);
- безпекові (зниження (підвищення) ризиків щодо нанесення збитків як життю та здоров'ю членів екіпажу, пасажирів, так і вантажу).

Відповідно до визначених критеріїв множину  $S^{nav}$  можна визначити як:

$$S^{nav} = \{s_1^{nav}, s_2^{nav}, s_3^{nav}, s_4^{nav}, s_5^{nav}, s_6^{nav}, s_7^{nav}\}, \quad (2.9)$$

де  $s_1^{nav}$  – ситуація штатна;

$s_2^{nav}$  – ситуація екстремальна;

$s_3^{nav}$  – ситуація позаштатна;

$s_4^{nav}$  – ситуація небезпечного зближення;

$s_5^{nav}$  – ситуація зіткнення;

$s_6^{nav}$  – ситуація аварійна;

$s_7^{nav}$  – ситуація катастрофічна.

Запропонована множина поділу ситуацій відповідно до умов навігаційної обстановки. У теперішній час вона може розглядатися як інструмент підвищення достовірності вироблення сигналів небезпеки, подолання невизначеності, пов'язаної із множинністю можливих управлінських рішень, правил COLREGs (інших регламентуючих документів) та вирішення проблеми генерації хибної тривоги. Також дана множина може використовуватися як джерело вхідних даних для вироблення можливих управлінських рішень в автоматизованих інформаційних системах (AIS, ECDIS) та системах управління рухом судна (СУРС).

Модель навігаційної обстановки є базовою моделлю при розробці маршруту у процесі планування переходу. Тобто модель можна інкапсулювати як вплив зміни навігаційної обстановки на елементи маршрутизації судна, так і на моделі, необхідні для визначення управлінських впливів судноводія на судно.

Стан системи "навігаційна обстановка – судно – судноводій" визначається топологією та характером взаємозв'язку її елементів. Звідси

поведінка системи зіставляється з ситуаціями, вираженими через вплив на показники критеріїв якості маршруту переходу.

У загальному випадку перехід від штатної ситуації  $s_1^{nav}$  до інших ситуацій  $s_i^{nav} \in S^{nav}$  відбувається у разі надходження до системи дискретних подій (погіршення метеоумов, поява навігаційної небезпеки, тощо) у відповідні проміжки часу. Тому в такій постановці систему "навігаційна обстановка – судно – судноводій" можна віднести до систем дискретного часу. У цій системі процес переходу між ситуаціями відбувається через різні за тривалістю проміжки часу. Їх тривалість корелюється з впливом зовнішніх факторів навігаційної обстановки, а зміна станів системи виражається у вигляді подій.

За допомогою математичного апарату формалізації дискретних дієвих систем (DEVs) [80] описуються системи, побудовані з урахуванням ієрархічної сукупності взаємодіючих об'єктів. На відміну від безперервних систем, взаємодія системи з довкіллям відбувається у вигляді надходження у систему дискретних подій у довільні проміжки часу. Переваги такої формалізації зумовлюються успадкуванням математичного апарату теорії динамічних систем. Зазначена формалізація дозволяє поєднувати елементи як безперервної, так і дискретної парадигм у межах одного об'єкта моделювання. Ще одна перевага даного апарату формалізації полягає у можливості синтезу моделі шляхом комбінування атомарних складових у більш складні об'єкти. У свою чергу, отримані елементи можуть брати участь у побудові ще більш складних об'єктів.

Таким чином, у загальному вигляді математичну модель навігаційної обстановки на основі формалізації дискретних дієвих систем (DEVs) можна описати таким виразом:

$$E^{nav} = \left( S^{nav}, X^{evnt}, W^{plan}, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, T^{S^{nav}} \right), \quad (2.10)$$

де  $S^{nav}$  – множина дискретних навігаційних ситуацій;

$X^{evnt}$  – множина вхідних подій;

$W^{plan}$  – модель запланованого маршруту переходу;

$\delta_{int} : M^{ship} \times W^{plan} \rightarrow S^{nav}$  – внутрішня функція переходу в множині навігаційних ситуацій, що визначає зміну ситуацій, у відповідності до відношення моделі руху судна ( $M^{ship}$ ) та моделі запланованого маршруту ( $W^{plan}$ );

$\delta_{ext} : M^{evnt} \times X^{evnt} \rightarrow S^{nav}$  – зовнішня функція переходу, що визначає зміну навігаційної обстановки, викликану впливом вхідних подій  $X^{evnt}$  та їх моделями  $M^{evnt}$ ;

$\lambda$  – функція генерації подій;

$T^{S^{nav}}$  – функція, що визначає граничний час знаходження судна у даній ситуації.

Кожна навігаційна небезпека характеризується множиною моделлю, що описує можливі траєкторії руху та області безпеки по відношенню до власного судна. Тому для генерації події, що викликана появою переходу об'єкта на морі в категорію навігаційної небезпеки, необхідно визначити зони, в яких буде здійснюватися моніторинг. У коментарях до МППЗС-72 введені такі поняття (рис. 2.5):

- зона оцінки ситуації ( $Z^{S^{nav}}$ );
- зона маневрування ( $Z^{mnav}$ );
- зона надмірного зближення ( $Z^{col}$ ).

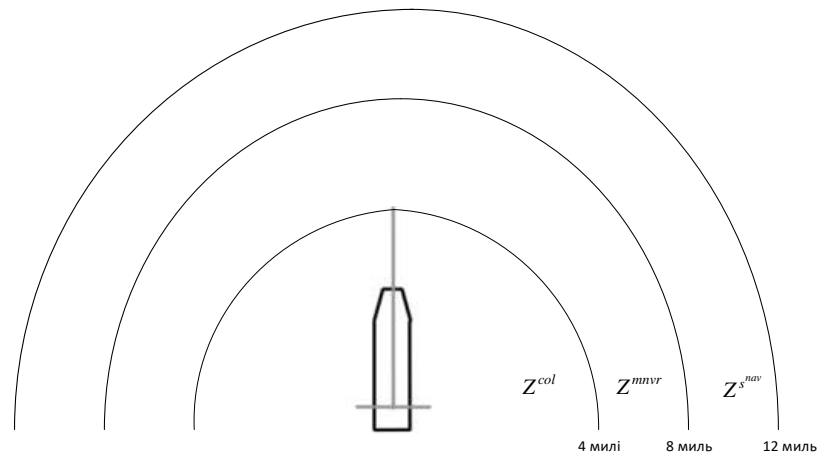


Рисунок 2.5 – Зони, що характеризують процес розходження суден з навігаційними небезпеками

Розглянемо навігаційну ситуацію  $S^{nav}$ , що описує навігаційну обстановку  $E^{nav}(t)$  у заданій зоні навколо власного судна у певний час  $t$ .

Нехай  $S^{nav}$  характеризується наявністю в зоні оцінки ситуації ( $Z^{s^{nav}}$ ) об'єктів, які представлені таким виразом:

$$M_i^{obj} = \{x, y, V, \psi, \Delta V, \Delta \psi, Z^{safe}\}, \quad (2.11)$$

де  $x, y$  – поточні координати об'єкта;

$V$  – швидкість об'єкта;

$\psi$  – курс об'єкта;

$\Delta V, \Delta \psi$  – похідні, що визначають динаміку зміни  $V, \psi$ ;

$Z^{safe}$  – зона безпеки навколо об'єкта.

Кожний  $i$ -ий об'єкт в момент часу  $t$  характеризується множиною можливих траєкторій руху по відношенню до власного судна:

$$U_i^{obj} = (M_i^{obj}, \Omega_i^{obj}), \quad (2.12)$$

де  $\Omega_i^{obj}$  – множина статичних та динамічних обмежень, до яких відносяться:

$$\Omega_i^{obj} = (\omega_1^{obj}, \omega_2^{obj}, \omega_3^{obj}, \omega_4^{obj}), \quad (2.13)$$

де  $\omega_1^{obj}$  – наявні навігаційні обмеження руху в зоні  $Z^{s^{nav}}$ ;

$\omega_2^{obj}$  – вимоги МППЗС-72;

$\omega_3^{obj}$  – вимоги критеріїв безпечного розходження за мінімальною безпечною дистанцією зближення, часу зближення, пеленгу або курсового кута ЛОД;

$\omega_4^{obj}$  – обмеження, зумовлені кінематичними параметрами руху об'єкту та їх маневрених характеристик.

Тоді функція генерація події має такий вигляд:

$$\lambda = \begin{cases} 2, & U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x, y) \in Z^{Z^{col}} \\ 1, & U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x, y) \in Z^{mnvr} \\ 0, & U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x, y) \notin Z^{mnvr} \end{cases} . \quad (2.14)$$

Генерація події виконується, коли можлива траєкторія руху об'єкта за встановлений час прогнозу  $T_{pred}$  приводить до попадання об'єкта із зони  $Z^{s^{nav}}$  в зону  $Z^{mnvr}$  та потребує корегування плану  $W^{plan}$ .

При цьому  $U_i^{obj}$  визначається як модель події  $M^{evnt}$ .

Відповідно ситуація  $s_1^{nav} \in S^{nav}$  є штатною, коли:

$$s_1^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \in \emptyset \\ \lambda = 0 \\ T^{S^{nav}} = T^{W^{plan}} \\ \delta_{int} : \mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_1^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_1^{nav} \end{cases} , \quad (2.15)$$

де  $\mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_1^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_1^{nav}$  – нечітка імплікація, побудована на продукційних правилах, яка визначає зміну ситуацій у відповідності до відношення моделі руху судна та моделі запланованого маршруту на заданий час прогнозу  $T_{pred}$ .

Відповідно, ситуація  $s_2^{nav} \in S^{nav}$  є екстремальною, якщо подія, що виникла, вимагає від судноводія корегування параметрів руху судна ( $M^{ship}$ ), зберігаючи задані показники якості (економічні, часові безпекові) та за заданий час повернутися до штатної ситуації, не відхиляючись від заданих

параметрів маршруту переходу:

$$s_2^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \emptyset \\ \lambda = 1 \\ T^{S^{nav}} = T^{trans} \\ \delta_{ext} : \mathcal{A}(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}) \circ R(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}, s_1^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_2^{nav} \\ \delta_{int} : \mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_2^{nav}) \xrightarrow{T_{trans}} s_1^{nav} \end{cases}, \quad (2.16)$$

де  $T_{trans}$  – заданий час переходу з  $s_2^{nav} \rightarrow s_1^{nav}$ .

Ситуація  $s_3^{nav} \in S^{nav}$  є позаштатною, якщо за заданий час  $T_{trans}$  ситуація не переходить у штатну, що потребує від судноводія зміни параметрів руху судна ( $M^{ship}$ ), зосередившись на забезпеченні безпекового та одного з інших показників якості (економічні, часові) та недопущенні переходу позаштатної ситуації в ситуацію небезпечного зближення  $s_4^{nav}$ :

$$s_3^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \emptyset \\ \lambda = 1 \\ T^{S^{nav}} = T^{trans} \\ \delta_{ext} : \mathcal{A}(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}) \circ R(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}, s_2^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_3^{nav} \\ \delta_{int} : \mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_2^{nav}) \xrightarrow{T_{trans}} s_1^{nav} \end{cases}. \quad (2.17)$$

Ситуація  $s_4^{nav} \in S^{nav}$  є ситуацією небезпечного зближення, якщо за заданий час прогнозу об'єкт, що викликав подію, знайде у зоні надмірного зближення з власним судном. Судноводій має змінити параметри руху судна ( $M^{ship}$ ), зосередившись на забезпеченні лише одного з показників якості (безпекового) та недопущенні переходу ситуації небезпечного зближення в ситуацію зіткнення  $s_4^{nav}$ :

$$s_4^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \emptyset \\ \lambda = 2 \\ T^{S^{nav}} \leq T^{col} \\ \delta_{ext} : \mathcal{A}(M^{evnt}, X^{evnt}) \circ R(M^{evnt}, X^{evnt}, s_3^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_4^{nav} \\ \delta_{int} : \mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_3^{nav}) \xrightarrow{T_{trans} < T^{col}} s_1^{nav} \text{ or } s_2^{nav} \end{cases} . (2.18)$$

Ситуація  $s_5^{nav} \in S^{nav}$  є ситуацією зіткнення, якщо за заданий час прогнозу  $Z_{nsft} \in Z^{safe}$  та переходить в аварійну ситуацію  $s_6^{nav}$ . Судноводій має змінити параметри руху судна ( $M^{ship}$ ), зосередившись на підвищенні лише одного з показників якості (безпекового) та недопущенні переходу ситуації зіткнення в катастрофічну ситуацію  $s_7^{nav}$ :

$$s_5^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \emptyset \\ \lambda = 2 \\ T^{S^{nav}} > T^{col} \\ \delta_{ext} : \mathcal{A}(M^{evnt}, X^{evnt}) \circ R(M^{evnt}, X^{evnt}, s_4^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_5^{nav} \\ \delta_{int} : \mathcal{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_5^{nav}) \xrightarrow{T_{trans} > T^{col}} s_6^{nav} \end{cases} . (2.19)$$

Ситуація  $s_6^{nav} \in S^{nav}$  є аварійною, коли при зіткненні судна з об'єктом судно та вантаж зазнає збитків, проте залишається на плаву;

Ситуація  $s_7^{nav}$  є катастрофічною, коли при зіткненні судна з об'єктом судно втрачає плавучість, та зазнають збитків життя та здоров'я екіпажу та вантаж.

## Висновки за другим розділом

1. У процесі планування переходу від "причалу" до "причалу" задля забезпечення навігаційної безпеки судна необхідне використання всієї наявної інформації для складання максимально повної картини навігаційної обстановки. Розробка судноводієм детальної уявної моделі переходу судна від початкової до кінцевої точки маршруту перед початком кожного плавання є запорукою безпечного виконання кожного рейсу. Особлива увага у процесі реалізації плану приділятиметься моніторингу ходу його виконання.

2. Удосконалено математичну модель району плавання для оптимального маршруту переходу судна. Доведено, що у процесі побудови оптимального маршруту необхідно провести повний аналіз всіх етапів переходу судна.

Для редукції кількості перебраних варіантів і значного зменшення витрати всіх видів ресурсів у процесі пошуку оптимальної траєкторії руху судна запропоновано використовувати ієрархічний підхід. У відповідності до нього, на кожному рівні ієрархії запропоновано використовувати моделі навколишнього простору та руху різного ступеня абстракції, деталізація яких відповідатиме ступеню деталізації моделі району плавання.

Досягнення сумісності результатів на кожному етапі планування досягається завдяки застосуванню евристичних знань і переваг багатоетапних принципів і підходів. У цьому випадку реалізуються переваги та нівелюються недоліки різних моделей та алгоритмів на кожному рівні ієрархії.

Крім того, запропонований підхід дозволяє задовольнити різним критеріям оптимальності. Поетапне зменшення розглянутих варіантів позитивно відбивається на зниженні обсягів ресурсів, задіяних у переробці інформації. І наприкінці, побудова ієрархічних моделей забезпечує цілеспрямоване накопичення та збереження навігаційної інформації,

потрібної для побудови ієрархічної баз знань для якісного оцінювання навігаційної обстановки, що складається на маршруті переходу.

3. Рекомендовані шляхи переходу судна визначаються тісним взаємним зв'язком між умовами плавання судна, а саме, типовими районами водних просторів за маршрутом переходу, особливостями судноплавства у них та експлуатаційними характеристиками судна. Детальні умови плавання судна подаються у вигляді типових груп, що враховують встановлені шляхи, види діяльності та обмеження.

4. *Розроблено математичну модель* навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, основу якої, на відміну від відомих, складає формалізм дискретних дієвих систем з елементами нечіткого логічного виведення, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек.

Введений апарат формалізації навігаційної обстановки дозволяє однозначно розділити інформацію та механізми її обробки у процесі моделювання. Крім того, дана формалізація дозволяє для моделювання систем динамічно додавати нові моделі, використовуючи як постійні, так і змінні часові інтервали.

Застосування ієрархічної композиції моделей стає основою для реалізації інтелектуальних технологій при побудові програмного забезпечення з його подальшим впровадженням в навігаційні системи та системи управління судном, пов'язаного з плануванням переходу на основі концепції e-Voyage (e-Navigation).

Основні результати розділу опубліковані у роботах [16, 105, 106]

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА Й УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ

Метою побудови та коригування маршруту руху судна є підвищення безпеки плавання в складних районах, а саме: при проході вузькостей, районів з високою інтенсивністю руху суден, районів навігаційних перешкод, обмежених глибин та несприятливих гідрометеорологічних умов. Розділ V Правила 34 Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі “SOLAS” [1] і Резолюція A.893(21) [2] вказують, що ретельна організація процесу планування переходу судна судноводієм має вирішальне значення для безпечного переходу й уникнення небезпечних ситуацій. Використання відповідних навігаційних карт та посібників, а також інструкцій ІМО під час планування кожного маршруту переходу є основою безпечного й ефективного переходу судна. План переходу судна має забезпечити безпеку руху, врахувати відповідні і гідрометеорологічні умови. Врахування несприятливих гідрометеорологічних умов має вирішальне значення під час планування маршруту, тому що ці чинники впливають на безпеку життя і здоров'я екіпажу та пасажирів, пошкодити або навіть повністю втратити судно і вантаж. Резолюція A.528 [70] визначає рекомендовані маршрути для певних районів світового океану. Дані маршрути можуть бути рекомендовані для формування маршрутів руху суден з урахуванням прогнозу погоди.

Оптимізація планування переходу судна – це оптимізація маршруту та роботи судна, яку судноводій може досягти в межах обмежень, які накладаються матеріально-технічним забезпеченням, метеорологічними умовами, контрактними домовленостями та іншими обмеженнями. Судноводій має виконати оптимізацію баласту та диференту, визначити маршрут з урахуванням метеорологічних умов з метою забезпечення безпеки руху судна та мінімізації споживання палива. Це дозволить здійснити своєчасне прибуття в кінцевий пункт маршруту та виконати умови

контракту.

Маршрути з урахуванням метеорологічних умов забезпечують мінімальне споживання палива та витрати на паливо, безпеку та комфорт, мінімальну тривалість або дистанцію переходу [7].

Оптимальний маршрут будується на основі прогнозів погоди, стану моря та індивідуальних характеристик судна для конкретного переходу. При традиційному підході щодо маршрутизації з урахуванням погодних умов, не враховуються технічні та маневрені характеристики судна.

3.1 Визначення загальних вимог, обмежень та припущень до методів підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу

Відповідно до “SOLAS” [124], розроблення плану переходу судна вважається критично важливим для безпечної навігації та уникнення небезпечних ситуацій. Наявні в ІМО [72] інструкції, а також морські карти та публікації, що застосовуються в судноплавстві, а також в концепції е-Навігації [82, 115] використовуються для забезпечення безпеки та ефективної навігації суден.

Ефективна навігація містить формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що визначається як оптимальна відповідно до вибраного критерію (декількох критеріїв) лінія маршруту судна. У визначених межах гідрометеорологічних та інших умов навігаційної обстановки для переходу судна "оптимальний" означає максимальну безпеку, мінімальні витрати палива та часу на перехід, або комбінацію цих факторів. Тому точність визначення оптимального маршруту залежить від таких чинників:

– точність прогнозування гідродинамічної поведінки судна за різних гідрометеорологічних умов;

– точність прогнозу погоди;

– можливість і практичність алгоритму оптимізації.

При формуванні безпечного оптимального маршруту суден з урахуванням прогнозу погодних умов, оптимального за часом руху враховується як фактор часу переходу, так і фактор безпеки переходу. Фактор безпеки переходу пов'язаний із навігаційними небезпеками (глибинами, перешкодами, гідрометеорологічними умовами тощо) за маршрутом. До оптимального маршруту відносяться маршрути, за якими можливий рух суден, забезпечує рівень безпеки для судна, вантажу екіпажу не нижче заданого, та є мінімальним за часом. Як правило, проблематика формування маршруту з урахуванням погодних умов моделюється як проблема досягнення мінімального часу переходу або проблема мінімального споживання палива з урахуванням існуючих. Як показує світова практика судноплавства, максимально короткий маршрут не завжди приходиться за мінімальний час. У загальному вигляді час переходу маршрутом визначається як

$$T_{route}^{sh} = \frac{D^{W_{route}^{sh}}}{V^{sh}}, \quad (3.1)$$

де  $T_{route}^{sh}$  – час переходу судна;

$D^{W_{route}^{sh}}$  – довжина маршруту  $W_{route}^{sh}$ ;

$V^{sh}$  – задана швидкість судна.

Враховуючи те, що маршрут переходу складається з початкового, кінцевого та проміжних пунктів, між якими судно рухається з постійною швидкістю та курсом, тоді час переходу маршрутом визначається як:

$$T_{route}^{sh} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^{W_{route}^{sh}}}{v_i^{sh}}, \quad (3.2)$$

де  $N$  – кількість пунктів маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

$d_i^{W_{route}^{sh}}$  – дистанція між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

$v_i^{sh}$  – швидкість судна між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  .

Відповідно до виразу (3.2), маршрут переходу судна визначимо (рис. 3.1) множиною точок (пунктів маршруту), що утворюють траєкторію судна, та пов'язаним з ними часом проходження.

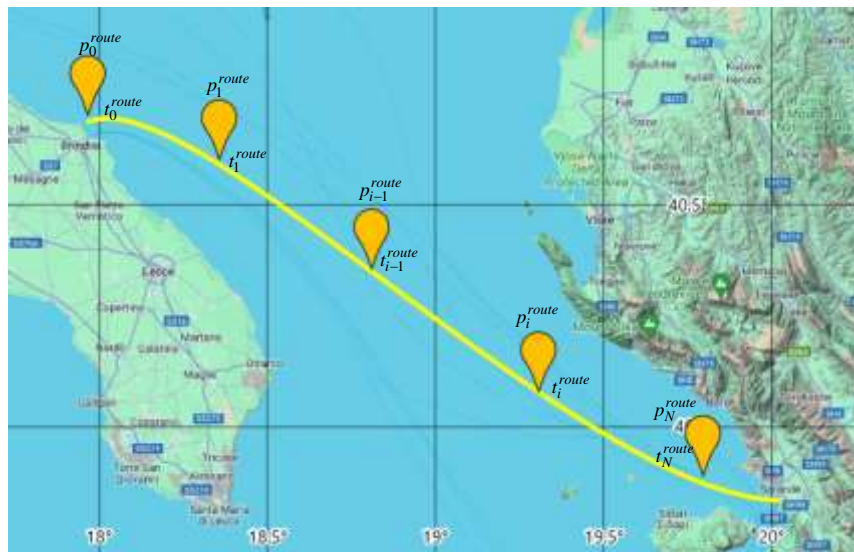


Рисунок 3.1 – Множина точок (пунктів маршруту), що утворюють траєкторію судна

Точка  $(p_i^{route})$  пункту маршруту  $W_{route}^{sh}$  визначається вектором:

$$p_i^{route} = \left[ Cord_i^{W_{route}^{sh}}, t_i^{route} \right], \quad (3.3)$$

який представляє довготу, широту та час відповідно проходження даного пункту маршруту.

Вектор управління судном задаємо:

$$U^{ship} = \left[ u_1^{sh}, \dots, u_{i-1}^{sh}, \dots, u_i^{sh}, \dots, u_N^{sh} \right] \quad (3.4)$$

при

$$u_i^{sh} = [v_i^{sh}, h_i^{sh}], \quad (3.5)$$

де  $v_i^{sh}$  – швидкість судна між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

$h_i^{sh}$  – курс судна між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  .

На швидкість руху судна впливають такі зовнішні фактори як сила та напрям вітру і течії, хвилювання. Вектор зовнішніх впливів визначимо:

$$INF_i = [inf_i^{wind}, inf_i^{curr}, inf_i^{wave}], \quad (3.6)$$

де  $inf_i^{wind} = [\beta_i^{wind}, v_i^{wind}]$  – вектор, що визначає напрям ( $\beta_i^{wind}$ ) та швидкість ( $v_i^{wind}$ ) вітру судна між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

$inf_i^{curr} = [\beta_i^{curr}, v_i^{curr}]$  – вектор, що визначає напрям ( $\beta_i^{curr}$ ) і швидкість ( $v_i^{curr}$ )

течії між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

$inf_i^{wave} = [h^{wave}, \beta^{wave}]$  – вектор, що визначає висоту ( $h^{wave}$ ) та напрям ( $\beta^{wave}$ )

хвиль між  $(i-1)$ -им та  $i$ -им пунктом маршруту  $W_{route}^{sh}$  ;

Звідси випливає, що для формування оптимального за часом руху безпечного маршрут переходу судна необхідно вибрати в районі плавання такі точки пунктів маршруту з множини  $p_1^{route} .. p_i^{route}$ , де вектор зовнішніх впливів  $INF_1 .. INF_i$  дозволяє сформувавши такий вектор управління  $U^{ship}$ , що досягається:

$$\begin{cases} T_{route}^{sh} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^N t_i^{route} \leq T_{dest}^{route}; \\ p_i^{route} \in MR, \quad i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (3.7)$$

де  $MR$  – район плавання, де забезпечується рівень безпеки не нижче заданого;

$T_{dest}^{route}$  – заданий час прибуття в кінцевий пункт маршруту.

Для алгоритму оптимізації маршруту переходу, швидкість та курс судна в кожній точці пункту маршруту вибираються як змінні управління, які необхідно оптимізувати під час подорожі.

### 3.2 Удосконалення методу формування безпечно оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

На рис. 3.2 показано узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна, який складається з таких елементів:



Рисунок 3.2 – Узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна

- модель району плавання, а саме з врахуванням прогнозу змін гідрометеорологічних умов в районі плавання;
- модель судна: оцінка впливу навколишнього середовища на маневрені

та технічні характеристики судна;

- обмеження: можуть залежати від часу, повинні бути задоволені при оптимізації маршруту (заборонені зони, канали, загальна тривалість рейсу, зміни потужності двигуна тощо) та безпеки (максимальні рухи судна та погодні умови);

- цілі: залежно від експлуатації судна, необхідно оптимізувати різні критерії (тривалість рейсу, споживання палива, безпека тощо), одночасно чи ні.

При розв'язанні задачі оптимізації накладаються обмеження, а саме: у поточній навігаційній ситуації навігації маршрут відповідатиме такому [7]:

1. Судно повинно йти в районі з достатньою глибиною води.
2. Судно не повинно плавати в умовах небезпечного вітру та хвиль.
3. План маршруту повинен враховувати динамічні гідрометеорологічні умови для дальнього та тривалого плавання.

4. Тривалість часового кроку зміни гідрометеорологічних умов, для моделювання навігаційної обстановки збігається з прогнозованим інтервалом в 1 годину. Даний інтервал дозволяє зробити припущення щодо стаціонарності цих умов. Функція керування (тобто швидкість і курс) є кусково-постійною протягом цього кроку часу. Прискорення не враховуються. Перехідні процеси, що пов'язані зі зміною керуючого впливу (наприклад, зміни в режимі роботи двигуна), дуже короткі відносно масштабу часу, тому ними можна знехтувати. Компоненти опору руху судна (лобовий опір, опір повітря, диферентний або опір керму) не враховуються, оскільки вони є відносно невеликі за величиною.

5. Швидкість руху судна в стоячій воді називається швидкістю судна відносно води. Проте під впливом гідрометеорологічних умов навігаційної обстановки (вітер, хвилі та течії) судно не досягає заданої швидкості. Це впливає на рівень витрати палива часом та на моделювання маршруту судна із врахуванням гідрометеорологічних умов. Дійсна швидкість судна з урахуванням впливу умов (швидкість руху судна відносно дна) визначимо як

швидкість плавання.

У морській практиці замість того, щоб розглядати вплив на судно додаткового опору через криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна рис. 3.3. Основні параметри, що використовуються для розрахунку зниження швидкості судна, є висота та напрямок хвиль та коефіцієнт ефективності судна. Вплив хвиль на швидкість руху судна визначається виразом [8]:

$$V_{wave}^{sh} = V^{sh} - \left( 0,75h^{wave} - 0,275 \cdot \delta^{wave} \cdot h^{wave} \right) \times \left( 1,0 - 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot M^{sh} V^{sh} \right), \quad (3.8)$$

де  $\delta^{wave}$  – кут між напрямком хвиль та курсом судна;

$M^{sh}$  – тоннажність судна.

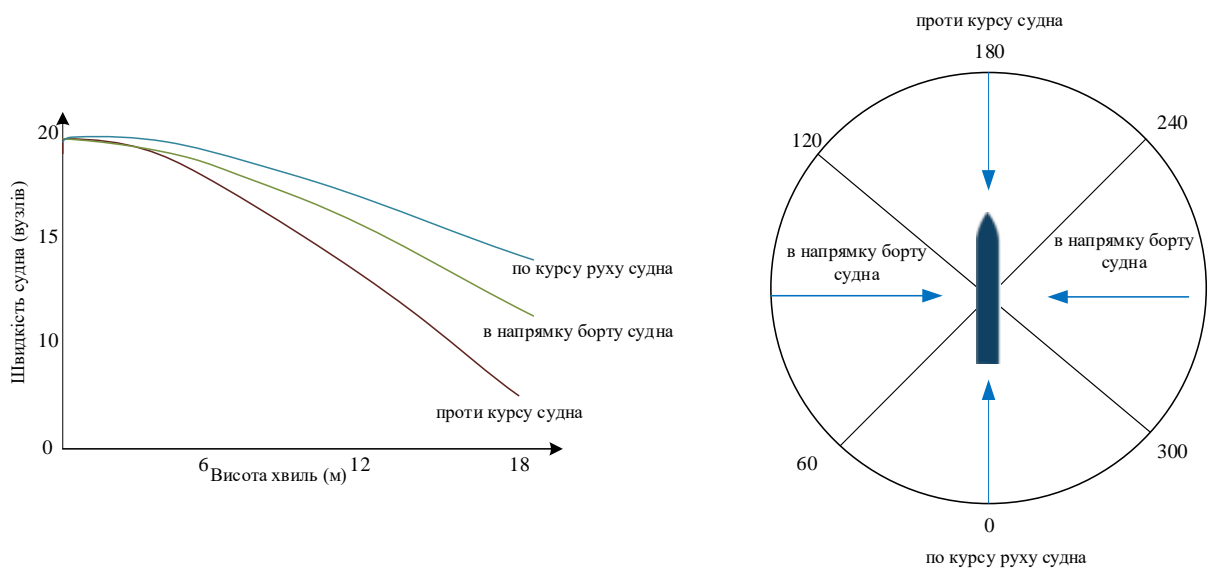


Рисунок 3.3 – Криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна

Іншими факторами, що впливають на фактичний профіль швидкості судна під час переходу є глобальні океанічні циркуляції та поверхневі течії (важливі для морського судноплавства). У загальному вигляді співвідношення для визначення  $V_{curr}^{sh}$  у двовимірному просторі є таким:

$$V_{curr}^{sh} = \left| V^{sh} - V_i^{curr} \right|. \quad (3.9)$$

Сили та моменти вітру, що діють на корпус і надбудову судна, можуть значно впливати на досягнення певної швидкості. Співвідношення швидкості вітру  $v_i^{wind}$  та швидкості судна відносно поверхні води  $V_{curr}^{sh}$  дозволяє визначити швидкість судна з урахуванням вітру  $V_{wind}^{sh}$ . В загальному вигляді співвідношення для визначення у двовимірному просторі відповідно має вид:

$$V_{wind}^{sh} = \left| V_{curr}^{sh} - v_i^{wind} \right|. \quad (3.10)$$

Швидкість руху судна, а отже, і його продуктивність, також суттєво залежить від умов експлуатації, геометрія судна, умови його навантаження, система управління тощо. Також для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації та навігації судна, важливу роль відіграє адекватне моделювання суднової рушійної установки. Проте, багато систем спрямовані на забезпечення підтримки маршрутизації, використовують спрощені методи, щоб уникнути потреби в детальних даних та розрахунків. У зв'язку з цілим набором методів динаміка та рух судна розглядаються з різним рівнем деталізації, що відповідно впливає на продуктивність і прогноз на рух судна. Тому швидкість з урахуванням факторів навколишнього середовища дорівнює:

$$V_{INF}^{sh} = V_{wind}^{sh} - V_{wave}^{sh}. \quad (3.11)$$

При формуванні маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов зазвичай застосовується лише рівняння руху в поздовжньому напрямку. Отже, загальний опір судна має бути збалансований відповідною тягою гвинта. Як правило, нехтують силами поперечного дрейфу, що впливають на курс і необхідний кут керма, що створює зусилля на кермо та може додатково збільшити опір. Тому модель поздовжнього руху судна можна показати так:

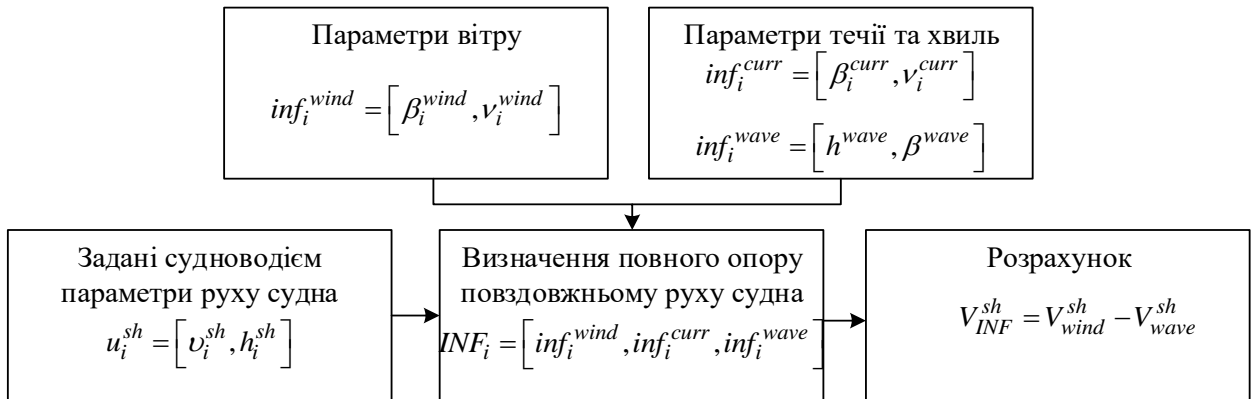


Рисунок 3.4 – Узагальнена модель поздовжнього руху судна

Швидкість судна  $V_{INF}^{sh}$  визначеною керуючою змінною, яку потрібно оптимізувати в процесі маршрутизації для формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов. Час, що витрачається при планових та аварійних затримках, пропонується розраховувати додатково. Інформація про характер аварійних ситуацій та причини планових стоянок дозволить виявити найбільш вразливі у відношенні потенційні елементи часу процесу судноплавства.

Для формалізації модель поздовжнього руху судна пропонується застосовувати математичний апарат нечіткої логіки. В основі нечітких продукційних моделей є база знань, що застосовується для визначення впливу повного опору на повздовжній рух судна.

Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов у процесі планування та виконання переходу, показано на рис. 3.5.

Для генерації початкового набору маршрутів необхідно виділити область плавання ( $MR$ ) між початковим та кінцевим пунктом переходу, яка містить у собі всі допустимі маршрути переходу ( $W_i^{rec}$ ):

$$MR = \sum_1^n W_i^{rec} . \quad (3.12)$$

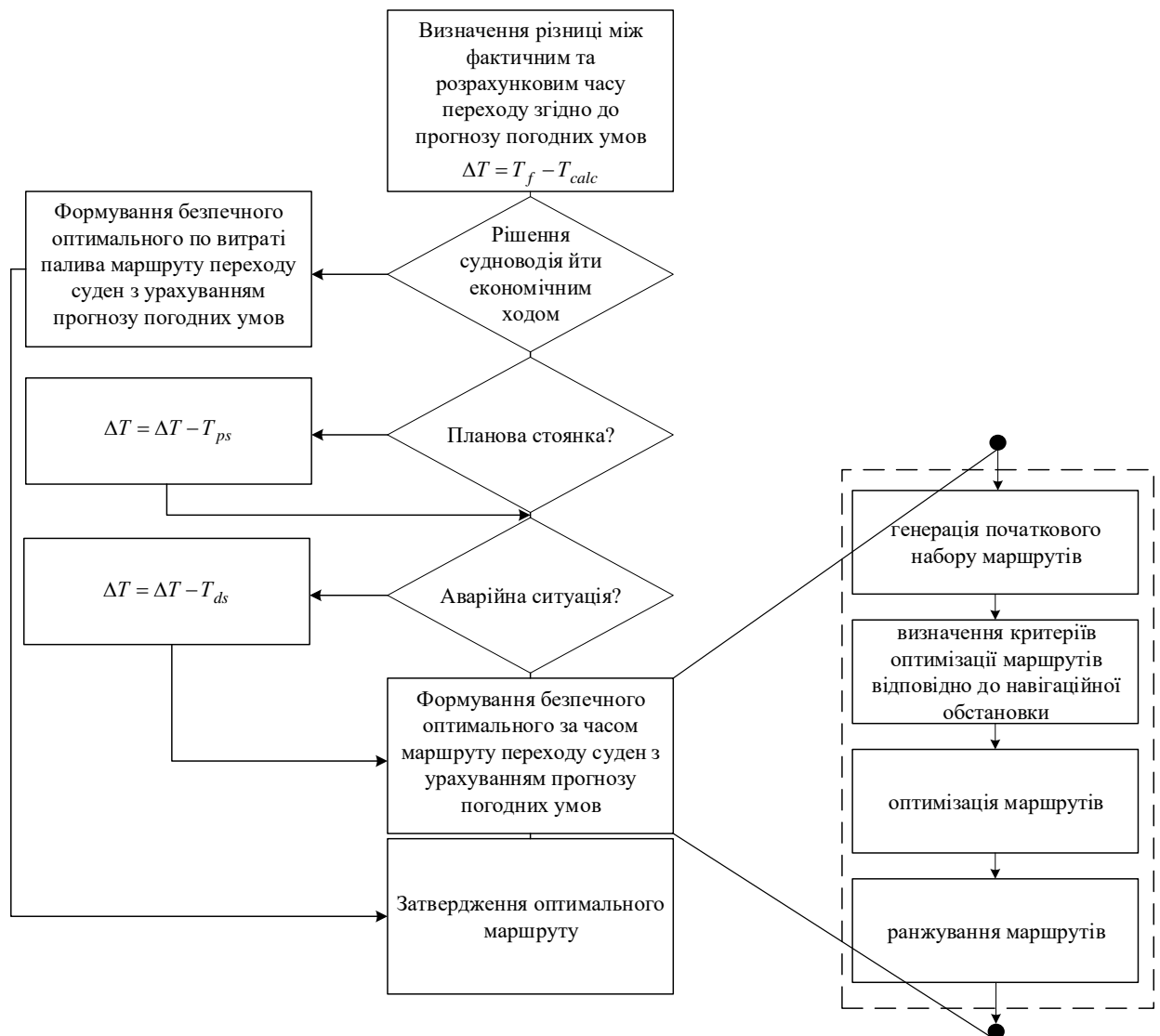


Рисунок 3.5 – Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

Далі за алгоритмом покриття гексагональної сіткою [122] вирішується завдання геометричного покриття визначеної області плавання  $MR$  :

*Крок перший:* координати поточного пункту знаходження судна задаються центром нульового гексагонального растру, а координати кінцевого положення судна задаємо центром цільового гексагонального растру.

*Крок другий:* будується початковий та кінцевий гексагональний растр.

Оскільки оновлення інформації про гідрометеорологічну обстановку здійснюється один раз на годину, то за відстань між центрами сусідніх гексагональних растрів пропонується брати дистанцію, що проходить судно за одну годину ( $T^{hour}$ ) з мінімальною швидкістю ( $V_{min}^{sh}$ ) відносно поверхні землі. Отже, відстань ( $D^{geks}$ ) від центру гексагонального растру до його сторони дорівнює:

$$D^{geks} = V_{min}^{sh} \cdot T^{hour} . \quad (3.13)$$

Враховуючи властивість гексагональних растрів, а саме:

$$D^{geks} = l^{geks} \cdot \sqrt{3} , \quad (3.14)$$

сторона гексагонального растру ( $l^{geks}$ ) задається виразом:

$$l^{geks} = \frac{V_{min}^{sh} \cdot T^{hour}}{\sqrt{3}} . \quad (3.15)$$

Загальна структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання  $MR$  має вид (рис. 3.6):

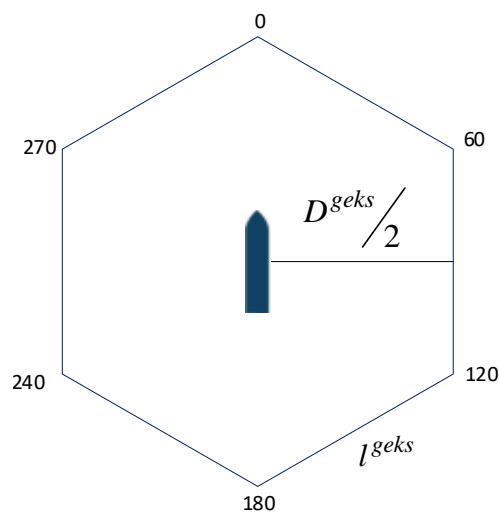


Рисунок 3.6 – Структура гексагонального растру для створення

гексагональної сітки визначеної області плавання

*Крок третій:* визначається орієнтація гексагональних растрів. Для даного етапу застосовуємо *pointy top* орієнтацію [35], що дозволяє орієнтувати гексагональні растри у напрямку руху судна до центру цільового гексагонального растру (рис. 3.7). Дане орієнтування гексагональних растрів дозволяє максимально вписати гексагональну сітку в область плавання *MR*.

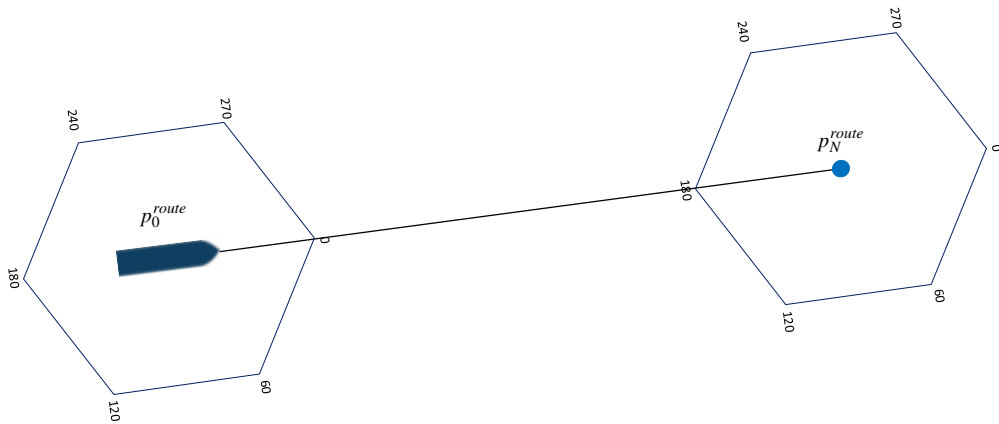


Рисунок 3.7 – Орієнтація початкового та кінцевого гексагонального растрів відповідно до напрямку центра цільового гексагонального растру

*Крок четвертий:* виконується побудова гексагональної сітки в заданій області плавання методом осьових координат (рис. 3.8) [35].

*Крок п'ятий:* виключення зі гексагональної сітки растрів, що належать до області плавання зі складними (небезпечними) гідрометеорологічними умовами. Побудова маршрутів від початкового растру до цільового (рис. 3.8) виконується методом формування векторів на гексагональному растрі. Для продовження маршруту вибирається той сусідній растр, в якому при заданому курсі судна в растрі  $\epsilon V_{INF}^{sh} \rightarrow \max$ . Відповідно кожен растр задається кортежем:

$$G = \langle D^{geks}, l^{geks}, V_{INF}^{sh} \rangle. \quad (3.16)$$



Рекомендований маршрут ( $W_i^{rec}$ ) – це маршрут, який не містить ділянок, що проходять через перешкоди або не забезпечують виконання вимог безпеки плавання [24]. Допустимість рекомендованого маршруту залежить від типу, технічних характеристик і завантаження судна. На безпеку плавання також впливають погодні умови та вибір швидкості та курсу під час проходження ділянки маршруту.

У свою чергу,  $W_i^{rec}$  можна описати:

$$W^{rec} = \{Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}, wid^{W^{rec}}\}, \quad (3.17)$$

де  $Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}$  – координати початкового, кінцевого та проміжних (поворотних) пунктів шляху;

$wid^{W^{rec}}$  – ширина шляху.

Оптимальним маршрутом переходу судна вважається безпечний маршрут, для якого досягаються високі значення критеріїв якості. Такими критеріями можуть бути:

- економія палива;
- зниження часу плавання;
- відповідність часу плавання заданому у плані переходу.

Економія палива є критерієм, що застосовується при формуванні безпечного оптимального маршруту переходу судна за умови, якщо рейсове завдання допускає зниження швидкості судна. Для цього судноводій переводить параметри руху судна у режим економічної швидкості  $V_e^{sh}$ .

Економічна швидкість  $V_e^{sh}$  – це швидкість, при якій, забезпечується максимальна економія паливно-мастильних матеріалів. Проте, мають дотримуватися такі умови:

- наявність резерву ходового часу, що дозволяє судну своєчасно прибути в порт призначення;
- тривала робота на цьому режимі не призведе до зниження надійності

енергетичної установки.

Основним показником економічності під час вибору  $V_e^{sh}$  приймається шляхова витрата палива  $g_{wr}^{sh}$  (при  $V^{sh} > 0$ ):

$$g_{wr}^{sh} = \frac{G_{wr}^{sh}}{V^{sh} \cdot t_{wr}^{sh}}, \quad (3.18)$$

де  $G_{wr}^{sh}$  – нормативна витрата палива на проходження судном ділянки маршруту;

$V^{sh}$  – швидкість руху судна на заданій ділянці маршруту;

$t_{wr}^{sh}$  – час проходження судном на заданій ділянці маршруту.

Нормативна витрата палива на проходження судном ділянки маршруту  $G_{wr}^{sh}$  приймається за розрахованими заздалегідь таблицями. Слід враховувати, що значення для цих таблиць розраховуються для судна, в якого корпус, головні двигуни, допоміжні механізми, гребні гвинти (рушії) перебувають у справному технічному стані. Системи та механізми судна обслуговуються кваліфікованим персоналом. Нормативні витрати пального вимагають дотримання розрахованих режимів руху судна.

На економічність витрати палива впливають як експлуатаційні фактори [121]:

- температурний режим двигуна;
- режим роботи двигуна;
- зноси вузлів та деталей;
- технічний стан,

так і зовнішні чинники та умови руху судна:

- напрям та швидкість вітру;
- напрямок поширення, період та висота вітрових хвиль;
- напрямок поширення, період та висота хвилі;
- напрям і швидкість течії,

що впливають на фактичну швидкість  $V^{sh}$  судна.

Перша група факторів відносяться до показників технічного стану судна. Вплив цих факторів можна мінімізувати безперервним контролем технічного стану судна та реагуванням на відхилення від допустимих значень.

Чинники другої групи впливають на вибір раціонального вибору економічної швидкості  $V_e^{sh}$ . Тому алгоритми планування оптимального маршруту повинні враховувати дві ці групи чинників, що дозволить реалізувати необхідний режим роботи головних двигунів на різних ділянках маршруту, відповідно до розрахованих режимів руху судна, використовуючи традиційну для більшості судноплавних компаній систему рейсового нормування витрат палива.

Врахування зовнішніх умов виконується збором та аналізом прогнозу погоди від берегових служб та судових систем. Дана інформація, як правило, подається як значення прогнозованих параметрів для вузлів сітки, що проектується на область плавання. Ця сітка має фіксований крок по координатах та часі.

Розглянемо формалізовану постановку задачі оптимізації маршруту руху щодо витрати палива. Маршрут судна представимо як траєкторію його руху та зміну лінійної швидкості на кінцевому числі ділянок з постійним значенням курсу. Визначимо маршрут руху судна як вектор:

$$W_{route}^{sh} = \left\{ \left( h_1, S_1, V_1^{sh} \right), \left( h_2, S_2, V_2^{sh} \right), \dots, \left( h_i, S_i, V_i^{sh} \right) \right\}, W_{route}^{sh} \in W^{rec}; \quad (3.19)$$

де  $h_i, V_i^{sh}$ ,  $i \in \overline{1, n}$  – курс, та швидкість судна на  $i$ -ій ділянці маршруту;

$S_i$ ,  $i \in \overline{1, n}$  – довжина  $i$ -ої ділянки маршруту.

Даний вектор  $W_{route}^{sh}$  однозначно визначає маршрут руху судна. Для визначення  $V_e^{sh}$  необхідно розглянути задану та фактичну швидкості руху

судна. Задана швидкість  $V^{eng}$  визначається роботою рушіїв, тому безпосередньо пов'язана з витратою палива. Фактична швидкість  $V^{sh}$  – це задана швидкість з урахуванням зовнішніх умов та напрямку руху судна. Фактичну та задану швидкість можна вважати рівними лише за відсутності зовнішніх впливів – хвилювання, вітру та течії. Тоді вектор  $W_{route}^{sh}$  має вид:

$$W_{route}^{sh} = \left\{ (h_1, S_1, V_1^{eng}, INF_1), (h_2, S_2, V_2^{eng}, INF_2), \dots, (h_i, S_i, V_n^{eng}, INF_i) \right\}, W_{route}^{sh} \in W^{rec}, \quad (3.20)$$

де  $INF_i$   $i \in \overline{1, n}$  – вектор зовнішніх впливів – хвилювання ( $inf_i^{wave}$ ), вітру ( $inf_i^{wind}$ ) та течії ( $inf_i^{curr}$ ):

$$INF_i = \left\{ inf_i^{wave}, inf_i^{wind}, inf_i^{curr} \right\}. \quad (3.21)$$

Задачу формування маршруту, що забезпечує економію палива, можна подати як:

$$G_F(W_{route}^{sh}) \rightarrow \min_{W_{route}^{sh} \in W^{rec}}, \quad (3.22)$$

де  $G_F(W_{route}^{sh})$  – цільова функція витрати палива для маршруту  $W_{route}^{sh}$ , що розраховується з використанням відомої характеристики рушіїв – шляхової витрати палива  $g_{wr}^{sh}$  при заданій швидкості  $V^{eng}$ .

Розв'язання задачі формування маршруту, що забезпечує економію палива (3.22) чисельними методами, є ускладненим, а саме:

– дане завдання відноситься до оптимізаційних завдань нелінійного програмування;

– система "судно-середовище" має великий діапазон значень, в які вона може прийти незалежно від кількості та ступеню впливу як зовнішніх

факторів, так і внутрішніх чинників. Це зумовлює достатньо обмежений вибір підходів, що мають методи прогнозування розвитку навігаційної обстановки;

- малий обсяг даних зменшує ймовірність отримання точного прогнозу;

- у процесі моделювання системи "судно-середовище" за допомогою сукупності диференціальних рівнянь відбувається заміна фізичної реальності, яка часто носить дискретний характер, безперервною моделлю. При переході до чисельних методів простір і час у цій безперервній моделі робляться знову дискретними, що після реалізації їх комп'ютерних системах зумовлює зниження швидкості видачі результатів.

Звідси необхідно відразу будувати, по-перше, дискретні моделі. А, по-друге, моделі мають формалізувати набір можливих станів та правила, за якими ці стани змінюють один одного з плином часу, та забезпечувати можливість роботи в умовах невизначеності.

Тому в методах формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, оптимального щодо витрати палива, доцільно застосовувати моделі на основі нечіткого клітинного автомату (*FCA*) [20]. Використання нечітких множин у моделі оптимального маршруту руху судна по витраті палива дає змогу при єдиному моделюванні враховувати багато ситуацій (розвитку навігаційної обстановки) та їх невизначеність. Крім того, застосування математичного апарату нечітких множин можна застосувати для процедур об'єднання даних. Для цього завдання можна використовувати операції над нечіткими множинами, оскільки їх формальна структура підходить для опису нечітких даних, що надходять від джерел інформації судна та берегових служб.

Головними перевагами нечіткого клітинного автомату є:

- здатність елементів до переміщення у просторі та застосування поняття стану до нового положення;

- стан кожної клітини оновлюється внаслідок виконання послідовності

дискретних постійних кроків у часі;

– змінні в кожній клітині оновлюються синхронно, виходячи зі значень змінних на попередньому етапі;

– правило визначення нового стану клітини залежить тільки від її локальних значень з деякої околиці цієї клітини.

Нечіткий клітинний автомат  $FCA$  є набором об'єктів:

$$\{W, S, N, R^{FCA}\}, \quad (3.33)$$

де  $W$  – дискретна метрична решітка нечіткого автомату;

$S$  – кінцева множина можливих станів клітин;

$N$  – кінцева множина, що визначає клітини, які впливають на новий стан поточної;

$R^{FCA}$  – продукційні правила  $FCA$ .

Для дискретної метричної решітки автомата застосовано гексагональну решітку, оскільки сусідні клітини входять в область Неймана (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Гексагональна решітка нечіткого клітинного автомату

$FCA$  модель формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, оптимального щодо витрати

палива передбачає поділ району плавання:

$$MR = \sum_1^n W_i^{rec}, \quad (3.34)$$

в якому здійснюється перехід судна на комірки (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Гексагональна решітка нечіткого клітинного автомату

Розміри комірок відповідають відріzkам маршруту однакової довжини за дискретні кроки у часі. Дані комірки формують дискретну метричну решітку автомату. Положення судна, його швидкість та інші параметри середовища фазифікуються.

Стан кожної клітини  $s_i \in S$  в момент часу  $t$  описується лінгвістичною змінною "шляхова витрата палива", що приймає значення, "низька", "середня", "висока". Ці значення кількісно задаються деякими нечіткими підмножинами  $g_{wr}^{low}$ ,  $g_{wr}^{mid}$ ,  $g_{wr}^{high}$  універсуму  $S$  за допомогою векторних функцій приналежності  $\mu_{g_{wr}^{low}}(s)$ ,  $\mu_{g_{wr}^{mid}}(s)$ ,  $\mu_{g_{wr}^{high}}(s)$ . На додаток до нечіткого стану клітини, що визначає її стан, кожна клітина може бути охарактеризована декількома властивостями, що становлять відповідні змінні навігаційної обстановки середовища в точці, пов'язаної з клітиною. Ці

властивості використовуються функцією переходу клітинного автомата для моделювання зміни шляхової витрати палива при різних зовнішніх факторах. Наприклад, кожна клітина характеризуватиметься напрямком та швидкістю вітру, напрямком поширення, періодом та висотою вітрових хвиль, напрямком та швидкістю течії. Судно описується його станом та швидкістю. Стан визначає характеристики судна (режим роботи двигуна, зноси вузлів та деталей, технічний розміри судна). Усі ці величини виражаються деякими нечіткими множинами.

Алгоритм роботи нечіткого автомату формується нечіткими продукційними правилами  $R^{FCA}$ . В початковий момент часу  $t_0$ , стан кожної клітини  $s_i \in S$  має деяке початкове значення функції приналежності. Далі автомат працює за кроками. На кроці з номером  $t_0 + \Delta t$  за допомогою  $R^{FCA}$  обчислюються нові значення функцій приналежності сусідніх клітин:

$$s_i : [S \times N] R^{FCA} \xrightarrow{t_i + \Delta t} \mu_{g_{wr}}(s_{i+1}). \quad (3.35)$$

Узагальнений метод формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов має такий вигляд (рис. 3.11).

Побудований нечіткий клітинний автомат на основі нечітких правил дозволяє використовувати описові невизначені знання про поведінку системи "судно-середовище". Параметри судна та факторів середовища описуються за функціями приналежності, що забезпечує формалізацію невизначеності навігаційної обстановки та описати можливі навігаційні ситуації. Невизначеність стану дорожнього руху описано із застосуванням нечітких визначень параметрів транспортних засобів та введенням нечітких операцій у процедуру оновлення моделі. Застосування нечіткого клітинного автомату роблять запропоновану модель придатною для неточного об'єднання даних у системі e-Navigation.

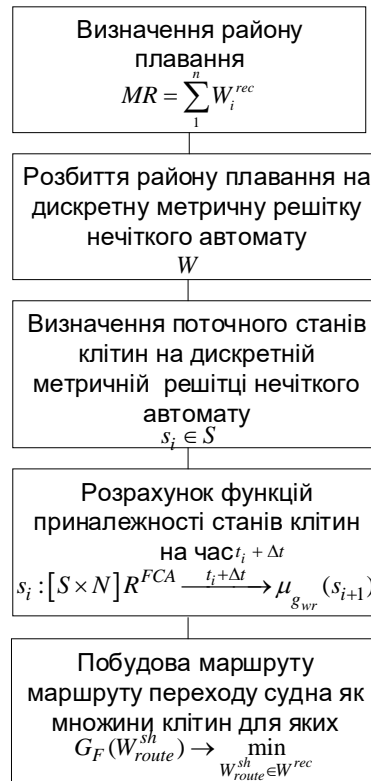


Рисунок 3.11 – Узагальнений метод формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

### Висновки за третім розділом

1. Удосконалено метод формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден, який полягає у застосуванні математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки у процесі прийняття рішень та оцінки впливу погодних умов на ефективність руху при формуванні правил роботи клітинного автомату для побудови маршрутів руху судна;

Запропонований підхід використовує систему продукційних правил та функції приналежності для визначення стану клітин нечіткого клітинного автомату та функції переходу між ними. Можливість використання нечіткої логіки для побудови клітинного автомата забезпечує моделювання системи

(судно-середовище), що дозволяє:

- враховувати нечіткі вхідні дані, що безперервно змінюються в часі (динамічні завдання), значення, які неможливо задати;
- формалізувати критеріїв оцінки та порівняння;
- проводити якісні оцінки як вхідних даних, так і вихідних результатів: оперування як значеннями даних, та й їх ступенем достовірності та її розподілом;
- враховувати досвід та знання судноводіїв в оцінці якості процесів, що відбуваються, коли неможливо здійснювати точні математичні обчислення.

2. Модернізовано метод формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який, на відміну від відомих, використовує математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

Основні результати розділу опубліковані у роботах [17, 68, 83]

## РОЗДІЛ 4

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ ПЕРЕХОДУ

У процесі планування переходу судна виникає необхідність в отриманні узагальнених характеристик надводних та підводних об'єктів, які використовуються як при оцінці навігаційної обстановки, так і при прийнятті рішень судноводієм на виконання управлінських впливів. У теперішній час завдання отримання узагальнених характеристик надводних та підводних об'єктів вирішується судноводієм евристичними методами на основі їх знань та досвіду [5, 67]. Автоматизувати вирішення цього завдання можна шляхом створення спеціального математичного і програмного забезпечення, побудованого із застосуванням розроблених методів подання знань про навігаційну обстановку та виведення значень узагальнених характеристик надводних та підводних об'єктів на основі знань про нього як на етапі планування маршруту, так і під час переходу. Ефективність застосування пропонує методів може бути оцінена на основі аналітико-стохастичного підходу та імітаційного моделювання.

#### 4.1 Визначення показників ефективності вдосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу

Для оцінки ефективності застосування розроблених методів необхідно визначити основні показники ефективності, що характеризують процес інформаційного забезпечення прийняття рішень під час планування переходу.

Маршрут переходу судна пролягає у районах, що характеризуються різною навігаційною складністю. Навігаційна безпека при проході даних

районів забезпечується за умови [69]:

$$D_{nt} < R(Z_{nsft}), \quad (4.1)$$

де  $D_{nt}$  – відстань до навігаційної небезпеки;

$R(Z_{nsft})$  – радіус зони навігаційної безпеки судна.

Отже, для безаварійного плавання та успішного виконання переходу судноводій має постійно здійснювати контроль поточних координат місця розташування судна у будь-який момент часу. Для забезпечення навігаційної безпеки судна при переході повинна постійно вестися навігаційна прокладка, яка містить числення, визначення місця судна і розрахунки маневрів для розходження з надводними та підводними об'єктами. Відповідно, навігаційна безпека плавання оцінюється ймовірністю безпечного плавання судна без зіткнення з надводними та/або підводними перешкодами з відомими координатами. Для розрахунку  $P_{\text{pass}}^{sf}$  під час плавання в районі з надводними та/або підводними перешкодами, що можуть становити навігаційну небезпеку, використовується функція кругового розподілу Релея [103]:

$$P_{\text{pass}}^{sf} = 1 - e^{-\left(\frac{D_{nt}}{\sigma_{rp}^{PCKП}}\right)^2}, \quad (4.2)$$

де  $\sigma_{rp}^{PCKП}$  – радіальна середньоквадратична похибка (РСКП) розрахункової точки маршруту.

Для забезпечення навігаційної безпеки плавання необхідно виконати такі розрахунки:

- оцінити ймовірність безпечного плавання ( $P_{\text{pass}}^{sf}$ ) для конкретних умов навігаційної обстановки;
- для випадків, коли:

$$P_{\text{pass}}^{sf} < P^{\text{визн}}, \quad (4.3)$$

де  $P^{\text{визн}}$  – задана ймовірність плавання, необхідно розрахувати допустиму величину РСКП визначення місця знаходження  $\partial_{P^{\text{визн}}}^{\text{РСКП}}$  залежно від  $P^{\text{визн}}$ ;

– вибрати способи визначення місця судна, що задовольняють умові:

$$\partial_{\text{гр}}^{\text{РСКП}} < \partial_{P^{\text{визн}}}^{\text{РСКП}}, \quad (4.4)$$

– розрахувати час визначення координат ( $t_{\text{coord}}$ ) для конкретних способів визначення місця судна;

– розрахувати дискретність обсервацій ( $t_{\text{observ}}$ );

– побудувати графік зміни  $\partial_{P^{\text{визн}}}^{\text{РСКП}}$  та  $\partial_{\text{гр}}^{\text{РСКП}}$  за часом для окремих ділянок маршруту переходу.

Також судноводії для визначення навігаційної безпеки плавання застосовують кількісний критерій безпеки – безпечна дистанція ( $D^{sf}$ ), під якою розуміється мінімальна відстань, яка вимірюється або визначається між судном та навігаційною небезпекою. Значення  $D^{sf}$  для розходження з виявленими стаціонарними навігаційними небезпеками, визначається:

при гальмуванні:

$$D^{sf} \geq D_{nt} - V^{sh} t_{dm}^{sh} - d_{stop}^{sh} - \partial_{P^{\text{визн}}}^{\text{РСКП}} - \partial_{stop}^{sh}, \quad (4.5)$$

де  $V^{sh}$  – швидкість руху судна;

$t_{dm}^{sh}$  – час, необхідний на прийняття рішення щодо маневру машинами судна;

$d_{stop}^{sh}$  – гальмівний шлях при заданих умовах судна;

$\partial_{stop}^{sh}$  – гранична похибка визначення гальмівного шляху;

при ухиленні поворотом судна:

$$D^{sf} \geq D_{nt} - V^{sh} t_{dm}^{sh} - r_{circle}^{sh} - \partial_{P^{визн}}^{PCKП} - \partial_{r_{circle}}^{sh}, \quad (4.6)$$

де  $r_{circle}^{sh}$  – радіус фактичної циркуляції судна;

$t_{dm}^{sh}$  – час, необхідний на прийняття рішення щодо маневру судна;

$\partial_{r_{circle}}^{sh}$  – гранична похибка визначення циркуляції судна;

Відповідно до норм "Подання на судах інформації про їх маневрені характеристики" [136], похибки визначення гальмівного шляху та діаметра циркуляції з ймовірністю 0,95 не повинні бути більше 10% від інерційно-гальмівних характеристик судна.

У свою чергу, визначення безпечних дистанцій розходжень з рухомими надводними та/або підводними об'єктами (суднами) ускладнено, оскільки відсутні категоричні вимоги у міжнародних та національних морських регламентуючих документах. У COLREGs [13] визначено поняття "безпечна швидкість" без наведення точних кількісних характеристик.

Наведені кількісні критерії навігаційної безпеки плавання можна застосовувати при виборі засобів та методів морської навігації, при обладнанні суден засобами навігації та управління, для формалізації критеріїв оптимальності маршруту руху судна, при аналізі навігаційної інформації в бортових системах управління судном.

Аналіз виразів (4.3-4.4) показує, що судноводій може безпосередньо впливати на ступінь навігаційної безпеки судна через час  $t_{dm}^{sh}$ , необхідний на прийняття рішення щодо маневру, та вибором "безпечної" швидкості руху судна. Для зменшення часу прийняття рішення необхідно зменшувати інтервали часу на сукупність операцій: інформаційної підготовки прийняття рішення, вибору рішення (плану дій), реалізації рішення. Також, у [130] поняття "безпечна швидкість" визначено без наведення кількісних

характеристик, тому вибір "безпечної" швидкості судноводієм залежить від повноти та достовірності інформації, яка використовується в процесі прийняття рішень під час планування переходу.

При прийнятті рішень судноводієм під час планування переходу важливе місце займає інформаційне забезпечення, пов'язане з отриманням та обробкою необхідної інформації про навігаційну обстановку. Інформаційну підтримку прийняття рішень характеризують через своєчасність (оперативність) і достовірність представлення інформації про навігаційну обстановку/ Отримати оцінки показників названих показників ефективності для різних способів інформаційного забезпечення прийняття рішень можна на основі розрахунково-стохастичних та імітаційних методів.

Діяльність судноводія у процесі планування переходу можна характеризувати часом, що є у наявності. Даний параметр визначається навігаційною обстановкою, та на фоні якої приймається рішення ( $t_{ex}$ ), і часом, необхідним на прийняття рішення зі встановленим рівнем обґрунтованості ( $t_{need}$ ). Необхідний час визначається тривалістю циклу планування та значно залежить від методів планування й прийнятої технології підготовки рішення.

Своєчасність прийняття рішення судноводієм оцінюється коефіцієнтом своєчасного вироблення та прийняття рішення впродовж ( $K_{eff}$ ) часу  $t_{ex}$  [140]:

$$K_{eff}(t_{ex}) = 1 - e^{-\frac{t_{ex}}{t_{need}}}. \quad (4.7)$$

Процес прийняття рішення судноводієм визначимо множиною:

$$DM^{sh} = \{DM_1^{sh}, DM_2^{sh}, DM_3^{sh}\}, \quad (4.8)$$

де  $DM_1^{sh}$  – множина, яка характеризує сукупність операцій інформаційної підготовки прийняття рішення судноводієм;

$DM_2^{sh}$  – множина, яка характеризує сукупність операцій щодо вибору варіанту рішення (плану дій);

$DM_3^{sh}$  – множина, яка характеризує сукупність дій судноводія, що ведуть до реалізації рішення.

Підмножина  $DM_1^{sh}$  містить операції збору, обробки та узагальнення інформації про навігаційну обстановку. Час інформаційної підготовки даних для прийняття рішення ( $T_{iSup}$ ) визначається сумою інтервалів часу, протягом якого готуються дані про навігаційну обстановку:

$$T_{iSup} = t_{col} + t_{proc} + t_{anls} + t_{adj}, \quad (4.9)$$

де  $t_{col}$  – інтервал часу, необхідний для збору даних про навігаційну обстановку;

$t_{proc}$  – інтервал часу для обробки інформації про навігаційну обстановку;

$t_{anls}$  – інтервал часу, необхідний для отримання узагальнених характеристик про надводні та підводні об'єкти та навігаційні умови плавання;

$t_{adj}$  – інтервал часу, необхідний для оцінки рівня небезпеки надводних та підводних об'єктів та навігаційні умов плавання.

Підмножина  $DM_2^{sh}$  містить операції, які характеризуються часом  $T_{dm}$ :

$$T_{dm} = t_{und} + t_{env} + t_{plan} + t_{ad}, \quad (4.10)$$

де  $t_{und}$  – час на усвідомлення завдання планування;

$t_{env}$  – час на оцінку навігаційної обстановки;

$t_{plan}$  – час на планування маршруту руху судна;

$t_{ad}$  – час на прийняття рішення судноводієм.

Операції з підмножин  $DM_3^{sh}$  на своєчасність прийняття рішення судноводієм не впливають, тому в подальшому розглядатися не будуть.

Запропоновані в роботі методи припускають зниження інформаційного навантаження на судноводія шляхом перерозподілу функцій між ними і АСУ (СУРС). Розроблені методи забезпечують автоматизацію:

– оцінки навігаційної обстановки ( $t_{env}$ );

– синтезу варіантів рішення щодо маршруту переходу (руху) з урахуванням існуючих ресурсно-часових обмежень ( $t_{plan}$ ) та визначення оптимального.

Для оцінки обґрунтованості планування з використанням запропонованих і традиційних методів використано коефіцієнт обґрунтованості:

$$K_{об}^k = \sum_{i=1}^{Q_{main}} a_i^{main} + \sum_{i=1}^{Q_{add}} a_i^{add} \cdot \gamma_i^k, \quad (4.11)$$

де  $a_i^{main}$  – кількісна оцінка значимості  $i$ -ої групи необхідних факторів;

$a_i^{add}$  – кількісна оцінка значимості  $i$ -ої групи додаткових факторів.

Під обґрунтованістю мається на увазі повнота врахування значущих чинників у процесі вироблення рекомендацій щодо визначення параметрів руху судна.

Нехай маємо  $Q_{max}$  факторів, які можна враховувати при плануванні маршруту руху судна. Всі фактори проранжовані за значимістю (ступінь впливу на якість рішення), тобто задана кількісна оцінка значимості кожного  $i$ -го фактора  $a_i$ , при цьому:

$$\sum_{i=1}^{Q_{\max}} a_i = 1. \quad (4.12)$$

Серед  $Q_{\max}$  факторів виділяється група факторів  $Q_{main}$ , які необхідно використовувати при плануванні переходу судна з використанням кожного з методів. Інші фактори вважаються додатковими, використання яких підвищує обґрунтованість рішення. Кожен  $i$ -ий фактор має  $z_i^k$  параметрів. Урахування  $i$ -го фактору  $k$ -им методом може бути повним або частковим. Коефіцієнт ( $\gamma_i^k$ ) повноти врахування  $i$ -го фактору  $k$ -им методом визначається так:

$$\gamma_i^k = \frac{z_i^k}{z_i}, \quad (4.13)$$

де  $z_i^k$  – кількість параметрів  $i$ -го фактору, що враховується  $k$ -им методом.

Необхідні чинники з групи  $Q_{main}$  враховуються будь-яким способом однаково, тому для даних факторів  $\gamma_i^k = 1$ . Несуперечність початкових даних визначається об'єктивними причинами. Використовувані методи повністю визначають спосіб врахування значущих чинників.

## 4.2 Розробка пропозицій щодо реалізації удосконалених методів та моделей в середовищі MatLab

Модель для проведення імітаційного моделювання складається з чотирьох основних компонентів (рис. 4.1):

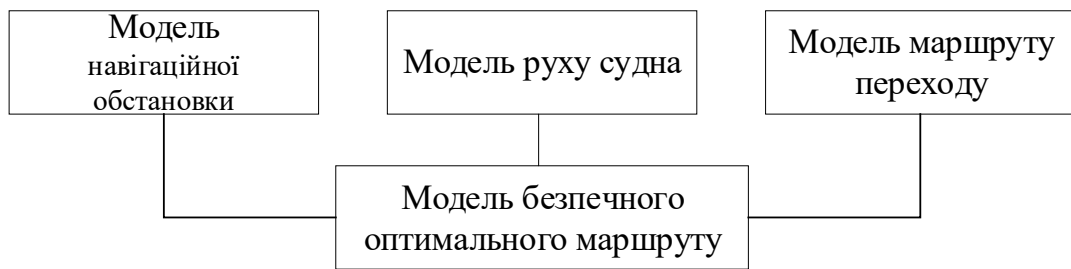


Рисунок 4.1 – Структурна схема моделі для проведення імітаційного моделювання в середовищі MatLab

1. Модель, що описує навігаційні умови, які впливають на судно (навігаційної обстановки).
2. Модель руху судна.
3. Модель маршруту переходу;
4. Модель, що реалізує метод формування безпечного оптимального маршруту.

Для проведення моделювання необхідно формалізувати процеси в запропонованій моделі.

Основними чинниками, що найбільшою мірою впливають на підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу, є:

- умови навігаційної обстановки;
- маневрені та технічні характеристики судна;
- умови, визначенні у завданні переходу (вантаж, пасажери, початковий, кінцевий та проміжні пункти маршруту).

Відповідно до структури процесу прийняття рішень судноводієм при плануванні та управлінні рухом судна, побудовано відповідну схему (рис. 4.2).

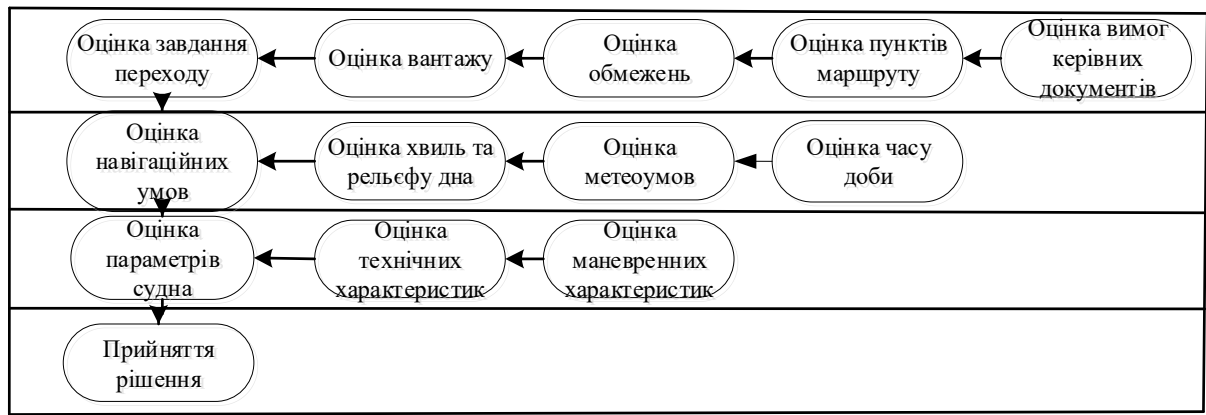


Рисунок 4.2– Схема прийняття рішень судноводієм при плануванні та управлінні рухом

Враховуючи нечіткість і невизначеність, що притаманна процесу прийняття рішень судноводієм при плануванні та управлінні рухом, для створення моделі використано математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки. Аналізуючи предметну область та процес прийняття рішень при плануванні маршруту руху судна, визначено структуру ієрархічного нечіткого логічного виведення (рис. 4.3) та чинники, що впливають на даний процес (табл. 4.1).

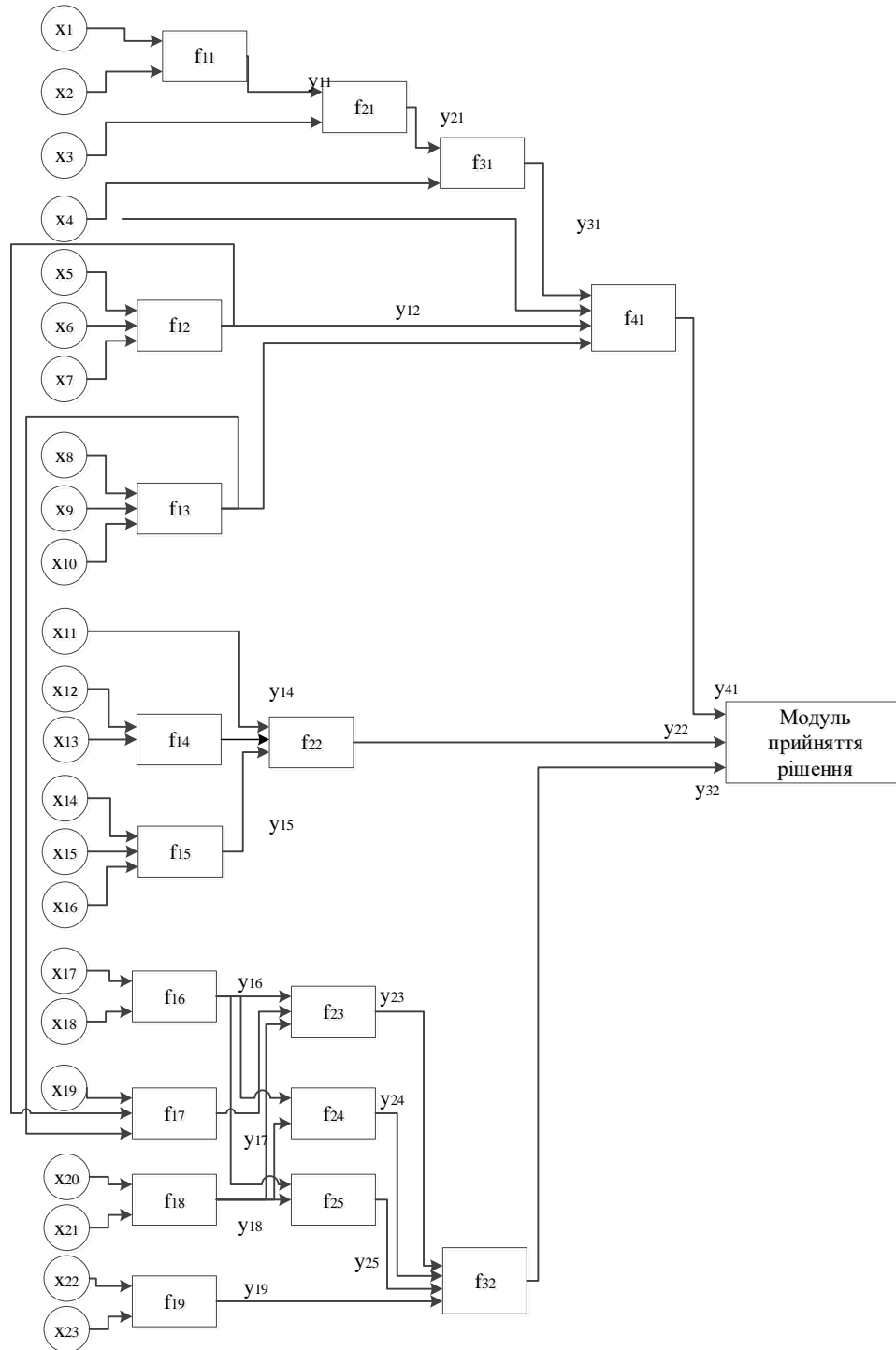


Рисунок 4.3 – Структура ієрархічного нечіткого логічного виведення у процесі прийняття рішень при плануванні маршруту руху судна

Таблиця 4.1 – Специфікація структури нечіткого логічного виведення

x1	Хмарність	x15	Поворотність
x2	Видимість	x16	Гальмівний шлях
x3	Напрямок вітру	x17	Захищеність цілі
x4	Сила вітру	x18	Обмеження
x5	Час доби	x19	Початковий пункт руху
x6	Висота хвиль	x20	Кінцевий пункт руху
x7	Напрямок течії	x21	Кількість проміжних пунктів
x8	Швидкість течії	x22	Вантаж
x9	Глибина по маршруту	x23	Вимоги замовника
x10	Оглядність водної поверхні	y41	Проміжні результати
x11	Швидкість судна	y22	Проміжні результати
x12	Радіус циркуляції	y32	Проміжні результати
x13	Динамічна стійкість	yn	Кінцевий результати
x14	Стійкість по курсу	fn	Нечітке логічне виведення

Відповідно до структури нечіткого логічного виведення, побудовано ієрархічну нечітку продукційну модель (ІНПМ) (нечітку множину типу 1 (НМТ1) та ієрархічну нечітку множину типу 2 (ІНМТ2)):

$$y_{011} = \mathcal{A}(x_1, x_2) \circ R(x_1, x_2, y_{11}), \quad (4.14)$$

$$y_{012} = \mathcal{A}(x_5, x_6, x_7) \circ R(x_5, x_6, x_7, y_{12}), \quad (4.15)$$

$$y_{013} = \mathcal{A}(x_8, x_9, x_{10}) \circ R(x_8, x_9, x_{10}, y_{13}), \quad (4.16)$$

$$y_{014} = \mathcal{A}(x_{11}, x_{12}, x_{13}) \circ R(x_{11}, x_{12}, x_{13}, y_{14}), \quad (4.17)$$

$$y_{015} = \mathcal{A}(x_{14}, x_{15}, x_{16}) \circ R(x_{14}, x_{15}, x_{16}, y_{15}), \quad (4.18)$$

$$y_{016} = \mathcal{A}(x_{17}, x_{18}) \circ R(x_{17}, x_{18}, y_{16}), \quad (4.19)$$

$$y_{017} = \mathcal{A}(x_{19}, y_{12}, y_{13}) \circ R(x_{19}, y_{12}, y_{13}, y_{17}), \quad (4.20)$$

$$y_{018} = \mathcal{A}(x_{20}, x_{21}) \circ R(x_{20}, x_{21}, y_{18}), \quad (4.21)$$

$$y_{019} = \mathcal{A}(x_{22}, x_{23}) \circ R(x_{22}, x_{23}, y_{19}), \quad (4.22)$$

$$y_{021} = \mathcal{A}(y_{11}, x_3) \circ R(y_{11}, x_3, y_{21}), \quad (4.23)$$

$$\varphi_{22} = \mathcal{A}(y_{14}, y_{15}) \circ R(y_{14}, y_{15}, y_{22}), \quad (4.24)$$

$$\varphi_{23} = \mathcal{A}(y_{16}, y_{17}, y_{18}) \circ R(y_{16}, y_{17}, y_{18}, y_{23}), \quad (4.25)$$

$$\varphi_{24} = \mathcal{A}(y_{16}, y_{18}) \circ R(y_{16}, y_{18}, y_{24}), \quad (4.26)$$

$$\varphi_{25} = \mathcal{A}(y_{18}, y_{16}) \circ R(y_{18}, y_{16}, y_{25}), \quad (4.27)$$

$$\varphi_{31} = \mathcal{A}(y_{21}, x_4) \circ R(y_{21}, x_4, y_{31}), \quad (4.28)$$

$$\varphi_{32} = \mathcal{A}(y_{23}, y_{24}, y_{25}, y_{19}) \circ R(y_{23}, y_{24}, y_{25}, y_{19}, y_{32}), \quad (4.29)$$

$$\varphi_{41} = \mathcal{A}(y_{12}, y_{13}, y_{31}, x_4) \circ R(y_{12}, y_{13}, y_{31}, x_4, y_{41}). \quad (4.30)$$

Застосувавши вирази (4.14 – 4.30) до формул (4.31 – 4.39), отримано ІНПМ.

Перший шар:

$$\varphi_{11} = F(\text{Fuzzy}(x_1, x_2)), \quad (4.31)$$

$$\varphi_{12} = F(\text{Fuzzy}(x_5, x_6, x_7)), \quad (4.32)$$

$$\varphi_{13} = F(\text{Fuzzy}(x_8, x_9, x_{10})), \quad (4.33)$$

$$\varphi_{14} = F(\text{Fuzzy}(x_{11}, x_{12}, x_{13})), \quad (4.34)$$

$$\varphi_{15} = F(\text{Fuzzy}(x_{14}, x_{15}, x_{16})), \quad (4.35)$$

$$\varphi_{16} = F(\text{Fuzzy}(x_{17}, x_{18})), \quad (4.36)$$

$$\varphi_{17} = F(\text{Fuzzy}(x_{19}), \varphi_{12}, \varphi_{13}), \quad (4.37)$$

$$\varphi_{18} = F(\text{Fuzzy}(x_{20}, x_{21})), \quad (4.38)$$

$$\varphi_{19} = F(\text{Fuzzy}(x_{22}, x_{23})). \quad (4.39)$$

Другий шар:

$$\varphi_{21} = F(\text{Fuzzy}(x_3), \varphi_{11}), \quad (4.40)$$

$$\varphi_{22} = F(\varphi_{14}, \varphi_{15}), \quad (4.41)$$

$$\varphi_{23} = F(\varphi_{16}, \varphi_{17}, \varphi_{18}), \quad (4.42)$$

$$\varphi_{24} = F(\varphi_{16}, \varphi_{18}), \quad (4.43)$$

$$\varphi_{25} = F(\varphi_{18}, \varphi_{16}). \quad (4.44)$$

Третій шар:

$$y_{31} = F(\text{Fuzzy}(x_4), y_{21}), \quad (4.45)$$

$$y_{32} = F(y_{23}, y_{24}, y_{25}, y_{26}). \quad (4.46)$$

Четвертий шар:

$$y_{41} = F(\text{Fuzzy}(x_4), y_{32}, y_{33}, y_{31}). \quad (4.47)$$

Результатом є вихідні значення виразу:

$$y_{22} = \text{DeFuzzy}(y_{22}), \quad (4.49)$$

$$y_{32} = \text{DeFuzzy}(y_{32}). \quad (4.50)$$

Розроблена модель формалізує процес прийняття рішень при плануванні маршруту руху судна. Дана модель дозволяє забезпечити:

- формалізацію процесу оцінки навігаційної обстановки при плануванні маршруту руху судна і прийняття рішень, який відбувається в умовах невизначеності;
- врахування у процесі оцінки навігаційної обстановки більшої кількості параметрів;
- виконання ієрархічного нечіткого логічного виведення без фазифікації-дефазифікації проміжних змінних, внаслідок чого знижується обчислювальна похибка;
- зниження кількості продукційних правил, якими описані залежності вихідних даних до вхідних, що дозволяє зменшити протиріччя та повторюваність в базі знань;
- реалізувати дану модель в MatLab, застосовуючи Fuzzylogic Toolbox та Simulink.

### 4.3 Розрахунок показників та оцінка ефективності удосконалених методів та моделей підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу

Оцінки названих показників отримаємо для трьох способів інформаційного забезпечення прийняття рішень судноводієм:

- неавтоматизованого, який у даний час є резервним способом ведення прокладки маршруту руху судна;
- існуючого автоматизованого, при реалізації якого використовуються існуючі СУРС, який є основним способом;
- пропонуваного автоматизованого, при реалізації якого пропонується використовувати розроблені в роботі методи.

У результаті моделювання отримані оцінки часових інтервалів виконання окремих операцій інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм. Часові інтервали виконання операцій інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм і способи автоматизації рішення завдань при виконанні цих операцій наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Часові інтервали виконання операцій інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм

Способи інформаційного забезпечення процесу ПР	Інтервали часу вирішення завдань інформаційного забезпечення				Сумарний час інформаційного забезпечення $\tau_{\text{пд}}, \text{с}$
	Способи вирішення завдань				
	збору	обробки	узагальн.	оцінки нав. обст.	
1. Неавтоматизований	340...460 (420...580)				340...460 (420...580)
	Неавтом.	Неавтом.	Неавтом.	Неавтом.	
2. Існуючий	35...45 (30...50)		35...45 (60...70)	40...60 (70...90)	110...150 (160...210)
	Автомат.	Автомат.	Автомат.	Автомат.	
3. Пропонуємий	70...95 (60...80)			15...20 (60...80)	85...115 (120...160)
	Автомат.	Автомат.	Автомат.	Автомат.	

Графіки залежності часу підготовки даних про об'єкти від кількості об'єктів наведені на рисунку 4.4.

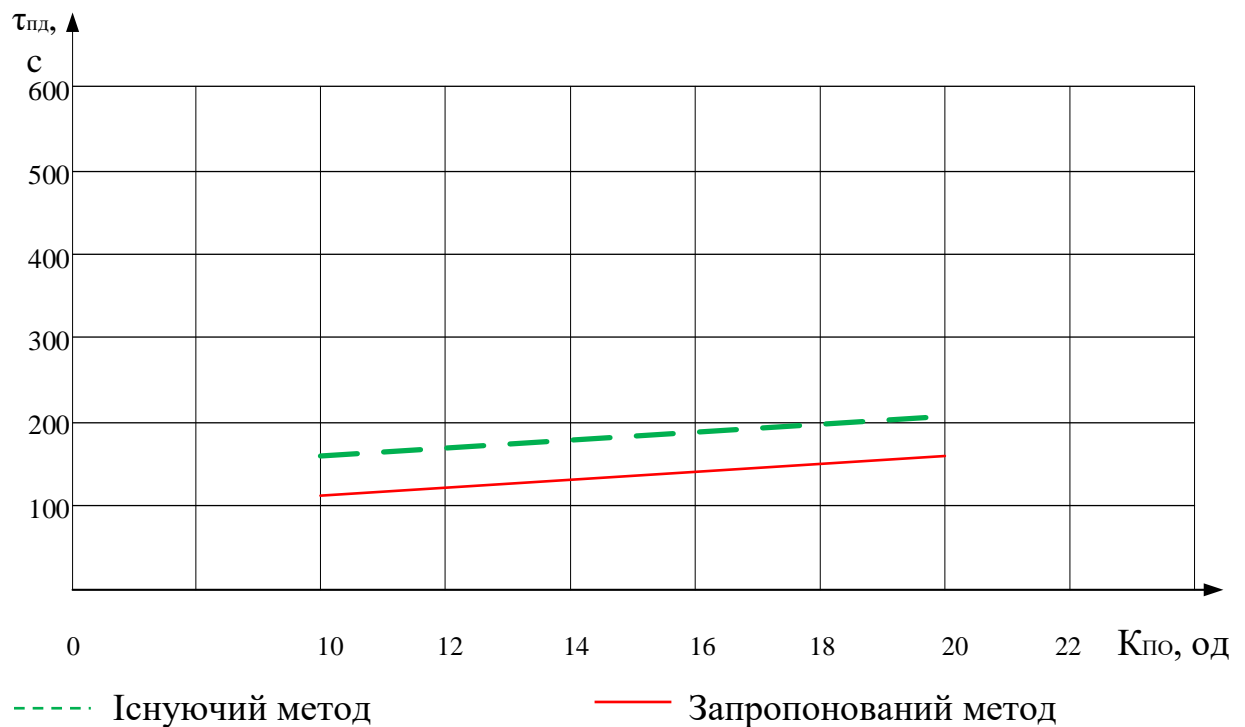


Рисунок 4.4 – Графік залежності часу підготовки даних про об'єкти від кількості об'єктів

Результати розрахунків значень міри можливості своєчасного здійснення інформаційного забезпечення процесу прийняття рішення для кожного способу забезпечення наведені в таблиці 4.3, а графіки залежності  $\mu_{пд}$  ( $\tau_{зад}$ ) для трьох способів забезпечення процесу прийняття рішень на рисунку 4.5.

Аналіз даних таблиць 4.2 і 4.3 показує, що час вирішення завдання інформаційного забезпечення процесу прийняття рішення судноводієм при використанні розроблених в дисертаційній роботі методів зменшується в середньому в 3,8 рази і в 1,3 рази в порівнянні з неавтоматизованим і автоматизованим без застосування запропонованих методів способами.

Таблиця 4.3 – Значення вірогідності своєчасного інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм

Способи інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень	Представлення інтервалу часу (L-R) типу	Значення $\mu_{\text{пд}}(t)$ для заданих інтервалів				
		$\tau_{\text{зад}}=20\text{с}$	$\tau_{\text{зад}}=40\text{с}$	$\tau_{\text{зад}}=60\text{с}$	$\tau_{\text{зад}}=80\text{с}$	$\tau_{\text{зад}}=120\text{с}$
1. Неавтоматизований	$\tau_{\text{пд}}^{\text{H}}(10)(400,60,60)$	0,002	0,0025	0,003	0,0048	0,009
	$\tau_{\text{пд}}^{\text{H}}(20)(500,80,80)$	0,0025	0,003	0,004	0,0052	0,008
2. Існуючий автоматизований	$\tau_{\text{пд}}^{\text{I}}(10)(130,20,20)$	0,004	0,01	0,03	0,82	0,6
	$\tau_{\text{пд}}^{\text{I}}(20)(185,25,25)$	0,0014	0,003	0,0067	0,015	0,074
3.Пропонований	$\tau_{\text{пд}}^{\text{П}}(10)(100,15,15)$	0,005	0,018	0,069	0,26	1
	$\tau_{\text{пд}}^{\text{П}}(20)(140,20,20)$	0,0025	0,0067	0,018	0,05	0,37

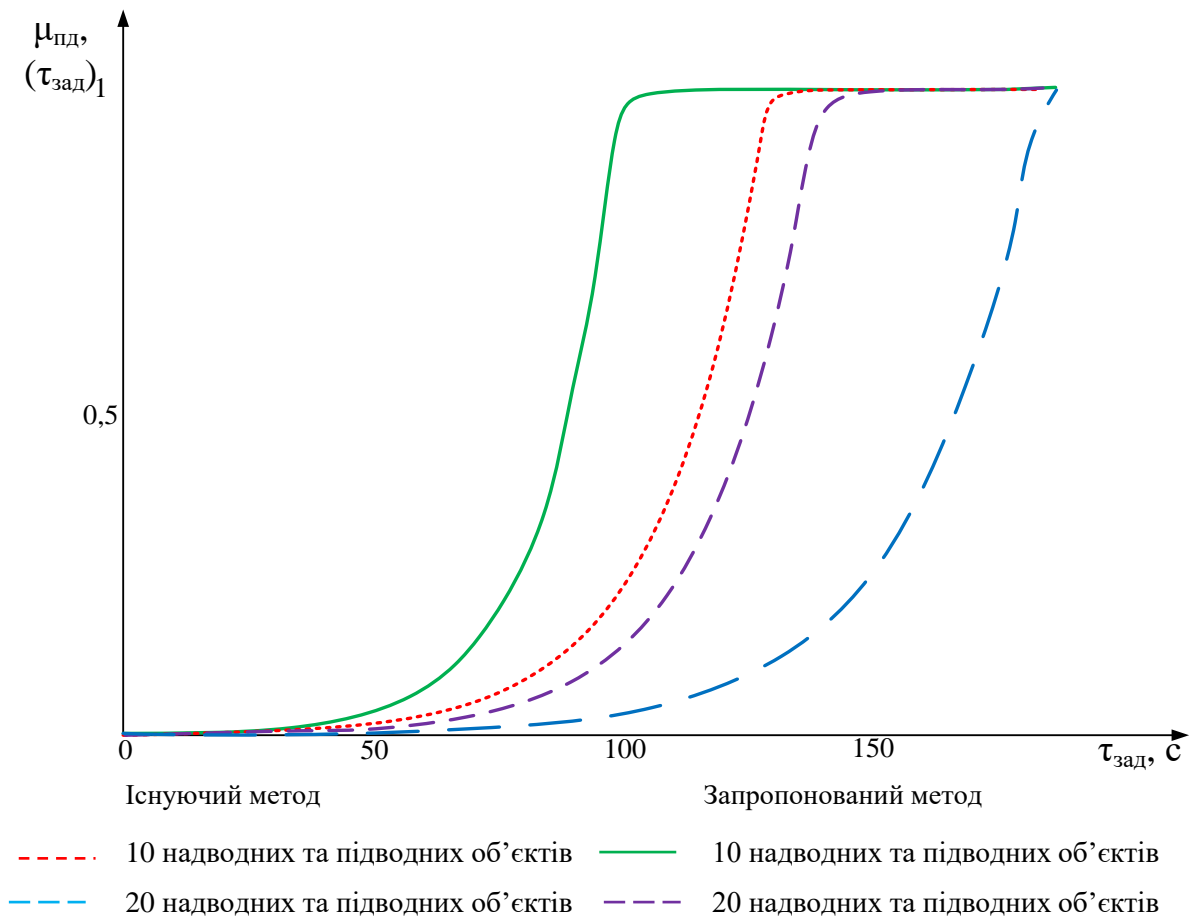


Рисунок 4.5 – Графік залежності  $\mu_{\text{пд}}(\tau_{\text{зад}})$  від часу прийняття рішень

Можливість своєчасного вирішення поставленого завдання із застосуванням запропонованих методів зростає для інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень на інтервалі (60...80) с при підготовці даних про 10 надводних та підводних об'єктів більш ніж в 38 разів у порівнянні з неавтоматизованим способом і більш ніж в 2,7 рази у порівнянні з існуючим автоматизованим способом, при підготовці даних про 20 об'єктів – більш ніж в 7 разів і більше ніж в 6 разів у порівнянні з тими ж способами відповідно.

У цілому можна зазначити, що застосування запропонованих методів прийняття рішень дозволить підвищити можливість своєчасного вирішення завдань більш ніж на 70% в порівнянні з неавтоматизованим й автоматизованим без застосування розроблених методів відповідно.

Результати розрахунків значень ймовірності своєчасного вирішення завдань інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм для різної кількості надводних та підводних об'єктів зазначеними вище способами наведені в таблиці 4.4, а графіки залежності цієї ймовірності від часу і кількості об'єктів  $K_{\text{ПО}}$ , наведені на рисунку 4.6.

Таблиця 4.4 – Значення ймовірності своєчасного рішення завдання інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень судноводієм

	Значення $\tau_{\text{пд}}(\tau)$ для $K_{\text{ПО}}=10$ , $K_{\text{ПО}}=20$	Значення $K_{\text{eff}}(t_{\text{ex}})$ для $K_{\text{ПО}}=10$ , $K_{\text{ПО}}=20$				
		$t_{\text{ex}}=20\text{с}$	$t_{\text{ex}}=40\text{с}$	$t_{\text{ex}}=60\text{с}$	$t_{\text{ex}}=80\text{с}$	$t_{\text{ex}}=120\text{с}$
1. Неавтоматизований	400	0,049	0,095	0,14	0,18	0,26
	500	0,04	0,08	0,11	0,15	0,21
2. Існуючий автоматизований	130	0,14	0,26	0,37	0,46	0,6
	185	0,1	0,2	0,28	0,35	0,48
3. Пропонований	100	0,18	0,33	0,45	0,55	0,7
	140	0,133	0,25	0,35	0,43	0,57

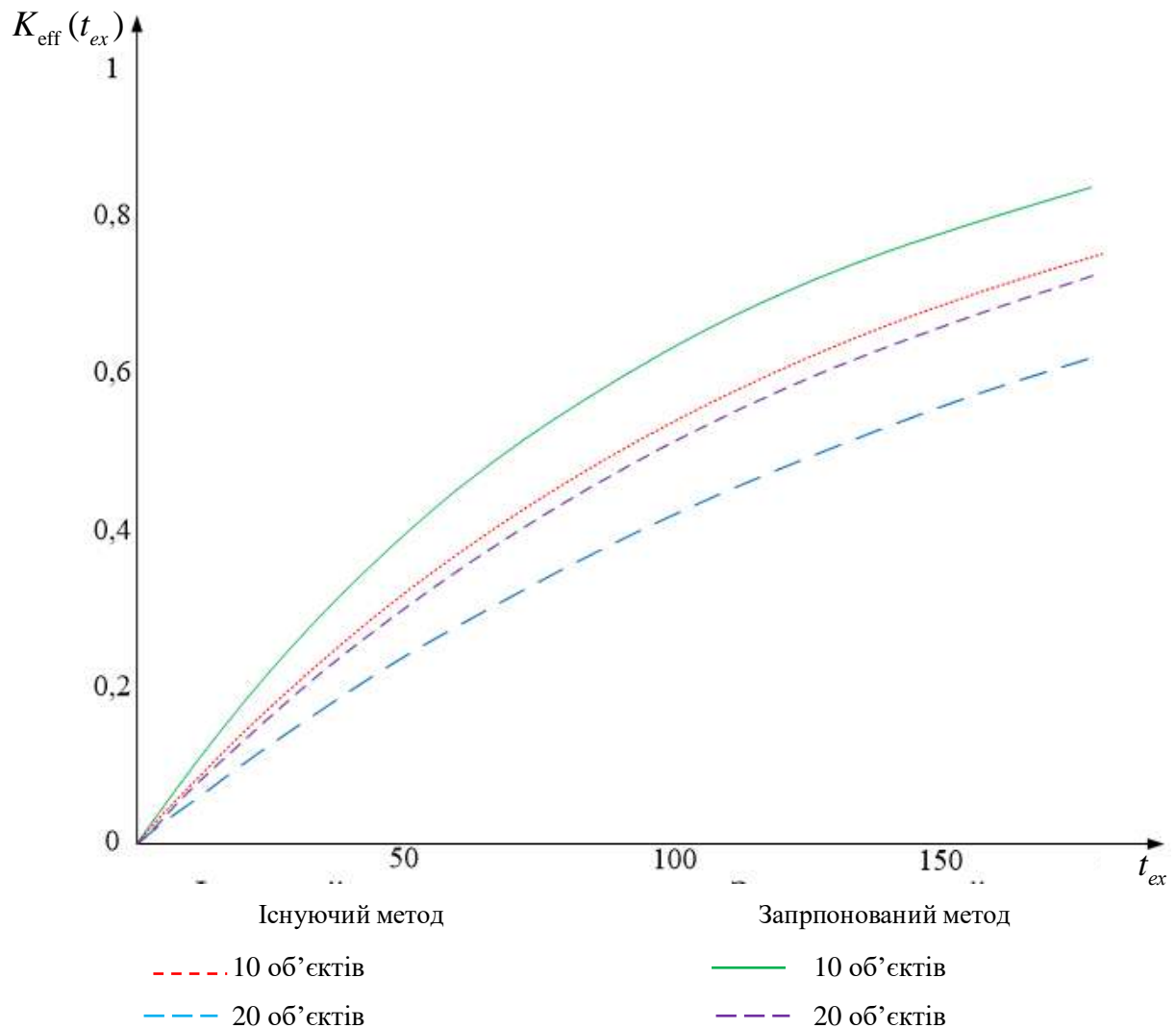


Рисунок 4.6 – Графік залежності  $K_{\text{eff}}(t_{\text{ex}})$  від часу прийняття рішень

Аналіз результатів виконаної оцінки ймовірності своєчасності вирішення завдань інформаційного забезпечення для трьох способів побудови системи забезпечення прийняття рішень судноводієм показав, що для  $t_{\text{ex}}$ , рівного 60 с і 80 с, ймовірність своєчасної підготовки даних по 10-ти і 20-ти об'єктах зростає більш ніж в 3 рази і більш ніж в 1,2 рази в порівнянні з неавтоматизованим і існуючим автоматизованим способами відповідно. Ця ймовірність для  $t_{\text{ex}}$ , рівного 120с, при підготовці даних по 10-ти і 20-ти об'єктах зростає більш ніж в 2,7 рази і більш ніж в 1,2 рази в порівнянні з названими способами відповідно.

Отже, застосування розроблених методів в інтересах підтримки

прийняття рішення судноводієм дозволяє підвищити ймовірність своєчасного отримання даних про навігаційну обстановку до 60% в порівнянні з неавтоматизованим способом інформаційного забезпечення та більш ніж на 16% в порівнянні із традиційно застосовуваним автоматизованим способом.

Таким чином, отримані результати оцінки  $K_{\text{eff}}(t_{\text{ex}})$  підтверджують результати оцінки  $\mu_{\text{пд}}(t_{\text{ex}})$ . Це свідчить, що їм можна довіряти, і підтверджує, що застосування запропонованих в дисертаційній роботі методів в інтересах підтримки прийняття рішень судноводієм дозволяє підвищити оперативність вирішення завдання планування переходу судна.

#### 4.4 Оцінка обґрунтованості прийняття рішень судноводієм

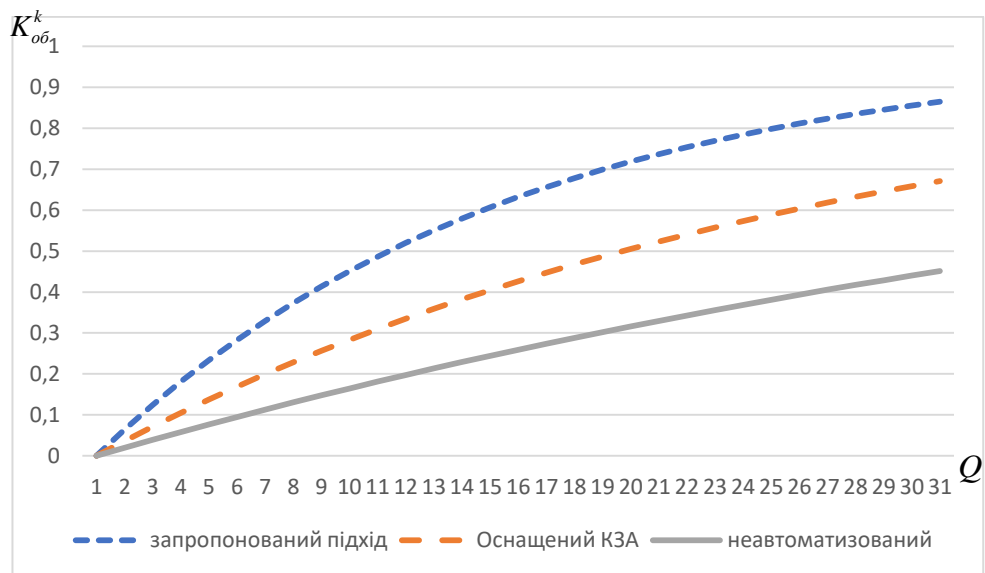
Несуперечність початкових даних визначається об'єктивними причинами. Використовувані методи повністю визначають спосіб врахування значущих чинників. Кількісна оцінка значущості факторів наведена в табл. 4.5, де К – непряме узагальнення (фактор явно не присутній в моделі, але інші чинники враховують його), Ф – функціональне узагальнення (окремий процес замінюється його результатом), П – пряме узагальнення, Н – безпосереднє узагальнення (значення фактору в явному вигляді присутні у формулі)

На рис. 4.7 наведені залежності  $K_{\text{п}}$  від кількості чинників  $Q$  ( $Q_{\text{мін}} = 0, Q_{\text{мак}} = 31$ ), що враховуються для різних способів реалізації запропонованих методів.

Врахування й обробка в запропонованих методах великої кількості чинників дозволяють за час, що є у наявності, збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 16÷34% порівняно з відомими. Одночасно зростає обґрунтованість отриманих рішень за рахунок адекватного опису предметної області великою кількістю значущих чинників.

Таблиця 4.5 – Кількісна оцінка значущості факторів

№	Назва фактору	Вага фактору	Спосіб урахування		
			Автоматиз.	Запропонований підхід	Без автоматиз.
1	Хмарність	0,03	Н	Н	Н
2	Видимість	0,02	Ф	Н	Н
3	Напрямок вітру	0,03	К	Н	Ф
4	Сила вітру	0,02	Ф	Н	Ф
5	Час доби	0,03	Ф	Н	Ф
6	Висота хвиль	0,05	Ф	Н	Ф
7	Напрямок течії	0,01	Ф	П	О
8	Швидкість течії	0,02	Ф	П	О
...					
26	Швидкість судна	0,02	К	П	Ф
27	Радіус циркуляції	0,05	Ф	Ф	П
28	Динамічна стійкість	0,05	К	Н	Ф
29	Стійкість по курсу	0,01	К	П	Н
30	Глибина по маршруту	0,01	Ф	П	Ф
31	Оглядність водної поверхні	0,01	К	П	Ф

Рисунок 4.7 – Залежність  $K_{\Pi}$  від кількості чинників, що враховуються

#### 4.5 Оцінка рівня можливих помилок

Для оцінки рівня можливих помилок при вирішенні завдань інформаційного забезпечення процесу прийняття рішення судноводієм введемо показник рівня помилки результату у вигляді ймовірності появи помилки в пропонованих для прийняття рішень даних про навігаційну обстановку на заданому інтервалі часу –  $L(\tau)$ .

Відповідно до технології інформаційного забезпечення, помилка результату може з'явитися внаслідок виникнення помилок у ході виконання окремих завдань інформаційного забезпечення. І з урахуванням того, що ці завдання щодо кожного об'єкта вирішуються послідовно, значення ймовірності появи помилки результату на заданому інтервалі часу може бути визначено за співвідношенням:

$$L(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^4 (1 - q_k(\tau)), \quad (4.51)$$

де  $q_k(\tau)$  – ймовірність виникнення помилки при вирішенні  $k$ -го завдання інформаційного забезпечення процесу прийняття рішення, до яких були віднесені завдання збору, обробки, узагальнення вихідних даних і оцінки навігаційної обстановки.

З огляду на те, що ймовірності виникнення помилок в технічних засобах і помилки, які допускаються судноводієм як в ході обробки інформації, так і в ході прийняття рішень, представляються у вигляді відношень кількості розрядів (операцій), відтворених з помилкою, до загальної кількості розрядів і не відображають залежності цих відношень від часу, доцільно для різних засобів обробки інформації.

Результати оцінок параметрів потоку відмов, які можуть виникнути при вирішенні завдань збору, обробки та узагальнення інформації і оцінки навігаційної обстановки наведені в таблиці 4.6. За допомогою цих оцінок за

співвідношенням (4.51) були визначені значення ймовірностей  $L(\tau)$  для заданих інтервалів часу, які наведені в таблиці 4.7, а графік залежності ймовірності помилки результату наведено на рисунку 4.8.

Таблиця 4.6 – Значення оцінок параметрів потоку відмов  $\lambda_k$ , що виникають при вирішенні завдань інформаційного забезпечення процесу прийняття рішень

Способи інформаційного забезпечення процесу ПР	Значення параметрів потоку відмов $\lambda_k$ для часткових завдань інформаційного забезпечення, 1/с				Сумарні параметри потоку відмов, 1/с
	збір даних	обробка даних	узагальнення даних	оцінка небезпеки надводного та підводного об'єкта	
1 Неавтоматизований	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,05 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$22,6 \times 10^{-4}$
2. Автоматизований без використання розроблених методів	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$21,2 \times 10^{-5}$
3. Автоматизований з використанням розроблених методів	$1,0 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$17,5 \times 10^{-6}$

Таблиця 4.7 – Значення оцінок ймовірностей помилки результату  $L(\tau)$  для різних інтервалів часу

Способи інформаційного забезпечення процесу ПР	Значення оцінок $L(\tau)$ для різних інтервалів часу, с				
	10	20	60	300	1200
1. Неавтоматизований	0,2026	0,3642	0,743	0,9988	0,9999
2. Автоматизований без застосування розроблених методів	0,02	0,039	0,114	0,453	0,91
3. Автоматизований із застосуванням розроблених методів	0,0002	0,00034	0,001	0,005	0,02

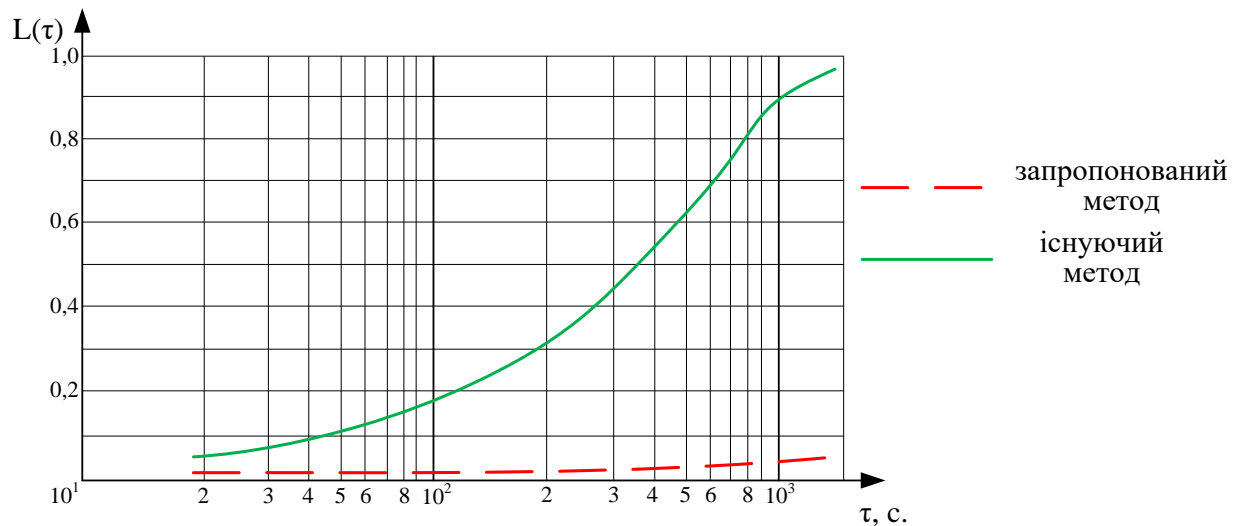


Рисунок 4.8 – Графік залежності  $L(\tau)$  від часу

Аналіз отриманих результатів оцінки рівня можливих помилок інформаційного процесу прийняття рішень показав, що ймовірність помилки результату інформаційного забезпечення автоматизованим способом із застосуванням розроблених в дисертаційній роботі методів в межах часу від 10 секунд до 5 хвилин на 3...4 порядки нижче в порівнянні з неавтоматизованим способом і на 3 порядки нижче в порівнянні з існуючим автоматизованим способом.

На інтервалі часу від 20 хвилин і вище перевага запропонованого способу забезпечення процесу прийняття рішення зростає в меншій мірі.

#### Висновок за четвертим розділом

1. Методом імітаційного моделювання досліджено варіант реалізації розроблених методів. Застосування запропонованих методів дозволяє підвищити показники своєчасності та обґрунтованості прийняття рішень судноводієм в порівнянні з існуючими методами, що, у свою чергу, сприяє підвищенню навігаційної безпеки суден під час планування переходу.

2. Проведені оцінки показали, що використання розроблених методів

ДОЗВОЛЯЄ:

– знизити час, необхідний для підготовки даних про навігаційну обстановку, в 3,8 рази і в 1,3 рази в порівнянні з неавтоматизованим і існуючим автоматизованим способами відповідно;

– підвищити ступінь можливості і ймовірність своєчасного вирішення завдань інформаційного забезпечення на 70% і на 30% в порівнянні з існуючими методами;

– збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 16÷34% порівняно з відомими;

– знизити рівень можливих помилок результату інформаційного забезпечення на 3...4 порядки і на 3 порядки в порівнянні з існуючими неавтоматизованим і автоматизованим способами відповідно.

Основні результати розділу опубліковані у роботах [68, 69, 123-127]

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене наукове завдання підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу шляхом розроблення та удосконалення моделей району плавання, оптимального маршруту переходу судна, навігаційної обстановки та методів формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов.

### **У роботі отримані наступні теоретичні та практичні результати:**

1. *Розроблено математичну модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, основу якої, на відміну від відомих, складає формалізм дискретних дієвих систем з елементами нечіткого логічного виведення, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек.* Запропонована модель дозволяє автоматизувати процес планування маршруту судна, враховуючи широкий спектр факторів, таких як погодні умови, наявність перешкод, характеристики судна тощо. Завдяки використанню нечіткої логіки, модель здатна працювати з неточною та неповною інформацією, що є характерним для реальних умов плавання. Впровадження ієрархічної структури моделі дозволяє ефективно обробляти великі обсяги даних та адаптуватися до динамічних змін у навколишньому середовищі. Запропонований підхід відкриває нові перспективи для розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у судноплаванні. Запропонований підхід дозволяє підвищити оперативність: зменшення часу підготовки даних про навігаційну обстановку в 4 рази порівняно з ручним способом і в 1,3 рази порівняно з існуючими автоматизованими системами.

2. Удосконалено метод формування безпечного оптимального щодо витрати палива маршруту переходу суден, який полягає у застосуванні математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки у процесі

прийняття рішень та оцінки впливу погодних умов на ефективність руху при формуванні правил роботи клітинного автомату для побудови маршрутів руху судна. Запропонований метод оптимізації маршруту судна базується на комбінації клітинних автоматів та нечіткої логіки. Використання продукційних правил та функцій приналежності дозволяє ефективно моделювати динамічні процеси в системі "судно-середовище" з урахуванням неточностей та невизначеностей. Запропонований підхід демонструє високу ефективність у задачах прийняття рішень в умовах неповної інформації та дозволяє враховувати експертні оцінки фахівців. Запропонований підхід дозволяє:

- підвищити обґрунтованість прийняття рішень судноводієм: збільшення ймовірності своєчасного вирішення завдань інформаційного забезпечення на 70% порівняно з існуючими методами;

- враховувати більше факторів: збільшення коефіцієнта повноти врахування чинників на 16-34% порівняно з відомими методами;

3. Модернізовано метод формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який, на відміну від відомих, використовує математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними. Кожен осередок гексагональної сітки являє собою певну ділянку водної поверхні і характеризується набором параметрів, таких як глибина, тип ґрунту, наявність підводних перешкод. Продукційні правила, своєю чергою, описують можливі переходи судна з однієї комірки в іншу залежно від поточного стану судна, погодних умов і характеристик сусідніх комірок. Це дозволяє зменшити кількість помилок: зниження рівня можливих помилок результату інформаційного забезпечення на 3-4 порядки порівняно з ручним способом і на 3 порядки порівняно з існуючими автоматизованими

системами.

4. За допомогою імітаційного моделювання було досліджено ефективність розроблених методів планування маршруту судна з урахуванням погодних умов. Порівняння з традиційними, ручними та автоматизованими методами показало значне покращення показників критерію навігаційної безпеки та ефективності навігації. Результати дослідження свідчать про високу ефективність розроблених методів і їхню перспективність для застосування в технології e-Navigation (e-Voyager).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Guide to Efficient Ship Route Planning with ECDIS // Virtue Marine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.virtuemarine.nl/post/a-guide-to-efficient-ship-route-planning-with-ecdis-technology>
2. Accuracy Improvement Methods and New Applications of Inertial-Based Navigation System / G. Yan et al. Sensors. 2022. "Navigation and Positioning". P. 100-122.
3. An improved integrated navigation method with enhanced robustness based on factor graph / Xiaokai Wei et al. Mechanical Systems and Signal Processin. Vol. 155, 2021. URL: P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107565>.
4. Andersson P., Ivehammar P. Cost benefit analysis of dynamic route planning at sea. Transportation research procedia. 2016. Vol. 14. P. 193–202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.055>.
5. Atyabi, A., Powers. Review of classical and heuristic-based navigation and path planning approaches. International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT). Vol. 5, 2013, P.1-14.
6. Avgouleas K., Sclavounos D. Fuel-efficient ship routing. NAUSIVIOS CHORA. 2014. Vol. 5. P. 39—72.
7. Aylward, K., Johannesson, A., Weber, R., MacKinnon, S., Lundh, M. (2020) An evaluation of low-level automation navigation functions upon vessel traffic services work practices. WMU Journal of Maritime Affairs. Vol. 19. P. 313-335. DOI:10.1007/s13437-020-00206-y
8. Baştürk, S., Erol, S. (2023) Optimizing ship speed depending on cargo and wind-sea conditions for sustainable blue growth and climate change mitigation. Journal of Marine Science and Technology. Vol. 28. P. 659-674.
9. Bye R., Holmen I., Zhang X., Størkersen K. Safety in marine and maritime operations: Uniting systems and practice. Safety Science. 2021. Vol. 139. P. 105-249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105249>

10. Chen P. Global path planning for autonomous ship: A hybrid approach of fast marching square and velocity obstacles methods / P. Chen, Y. Huang, E. Papadimitriou, J. Mou, and P. van Gelder. – Ocean Eng., vol. 214, 2020, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107793.

11. Cherniavskiy V., Diahyleva O., Masonkova M., Nosov P. Formal-logical approaches to building information model of navigator in the form of a dynamic trajectory : IV International Maritime Scientific Conference — Ship Power Plants and Technical Operation : тези доп., м. Одеса, 22 квіт.. 2022 р. / 2022. С. 205.

12. ClassNK-NAPA GREEN. NAPA. URL: <https://www.napa.fi> (дата звернення: 21.11.2024).

13. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREG) : Міжнародний правовий акт від 20.09.1972: станом на 15 лют. 2023 р. URL: [https://www.afcan.org/dossiers\\_reglementation/colreg\\_gb/contents.html](https://www.afcan.org/dossiers_reglementation/colreg_gb/contents.html)(дата звернення: 15.02.2023).

14. Daniel K. Theta\*: Any-angle path planning on grids / Daniel K., Nash A., Koenig S., Felner A. – J. Artif. Intell. Res., 2010, vol. 39, pp. 533-579.

15. Du, L., Goerlandt F., Kujala, P. Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 200, 2020. P. 1-23. URL:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106933>

16. Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. № 1–2 (26–27), 2023. С. 82-95.

17. Dudchenko S., Tymochko O., Makarchuk D., Golovan A. Application of fuzzy cellular automata to optimize a vessel route considering the forecasted hydrometeorological conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 1 №3(127). С. 28-37.

18. Dyrzcz C. Voyage planning and weather / C. Dyrzcz// – Polish Naval

Academy.– Gdynia, 2020. 132 p.

19. Fiorini M., Capata A., Bloisi D. D. AIS Data Visualization for Maritime Spatial Planning (MSP). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. 2016. Vol. 5. P. 45–60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.12.004>

20. Grifoll, M., Bor'en, C., Castells-Sanabra, M. (2022) A comprehensive ship weather routing system using CMEMS products and A\* algorithm. *Ocean Engineering*. Vol 255, 2022. P.1-15. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111427.

21. Guruji A. K. Time-efficient A\* algorithm for robot path planning / A. K. Guruji, H. Agarwal, D. K. Parsediya. – *Procedia Technol.*, 2016, vol. 23. – pp. 144–149.

22. Han P., Yang X. Big data-driven automatic generation of ship route planning in complex maritime environments. *Acta Oceanologica Sinica*, Vol. 39, no. 8, 2020. pp. 113–120.

23. Harma A., Nazir S., Ernstsens, J. Situation awareness information requirements for maritime navigation: A goal directed task analysis. *Safety Science*. Vol.120(1), 2019.P.1-22. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.016>

24. He, Y.K., Zhang, D., Zhang, J.F. & M.Y. Zhang. (2019) Ship route planning using historical trajectories derived from AIS data. *The International Journal of Transportation Research*. Vol. 13, No 1. P.69-76.

25. Helong W. Development of voyage optimization algorithms for sustainable shipping and their impact to ship design : дис. ... д-ра. філософії. : 271. Готенбург, 2020. 68 с.

26. Hsu W-KK, Chen J-W, Huynh NT, Lin Y-Y. Risk Assessment of Navigation Safety for Ferries. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. 10(5):700. URL:<https://doi.org/10.3390/jmse10050700>

27. Improving positioning accuracy of vehicular navigation system during GPS outages utilizing ensemble learning algorithm / Jing Li et al. *Information Fusion*. Vol. 35, 2017. URL: P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.08.001>.

28. Improving the accuracy of the global navigation satellite system : монографія / N. Elmunim ; Ionosphere - New Perspectives. IntechOpen., 2023.– 178 с. DOI: 10.5772/intechopen.1001054

29. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) : Міжнародний правовий акт від 02.10.1978: станом на 15 лют. 2023 р. URL: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (дата звернення: 15.02.2023).

30. Iphar C., Jouselme A.L. A geometry-based fuzzy approach for long-term association of vessels to maritime routes. Ocean Engineering. Vol. 281. 2023. C. 11-47. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114755>.

31. Jang D., Kim J. Development of ship route-planning algorithm based on rapidly-exploring random tree (RRT\*) using designated space. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, no. 12. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/12/1800>

32. Jwo D., Biswal A., Zhang X., Mir A. Artificial neural networks for navigation systems: a review of recent research. Applied Sciences. 2023. Vol. 13 no 17. P. 44-75. URL: <https://doi.org/10.3390/app13074475>

33. Kamil F., Tomasz N., Adam W. Overview of Definitions of Maritime Safety, Safety at Sea, Navigational Safety and Safety in General. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Vol. 13, 2019. P. 285-290. URL: <https://10.12716/1001.13.02.03>.

34. Kao, S.-L., Lin, J.-L., Tu, M.-R.: Utilizing the fuzzy IoT to reduce Green Harbor emissions. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Vol. 15, no 2. 2021. P. 365-370. URL: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01844-z>

35. Ke, Y. Comparative analysis of path planning algorithms and prospects for practical application. Highlights in Science, Engineering and Technol. Vol. 52, 2023, P.202-207.

36. Koshevyy V.M., Konovets V.I., Shyshkin O.V. SMART Digital Selective Calling User Interface on the Base of Integration Maritime Navigation and Radiocommunication Equipment. // *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 15, No. 2. 2021. pp. 291– 297.

37. Koshevyy V.M., Shyshkin O. VHF/DSC - ECDIS/AIS Communication on the Base of Lightweight Ethernet // *Proceedings of the International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017)*, Gdynia, Poland, 21 – 23 June 2017, Editor Adam Weintrit // CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton – London - New York – Leiden, 2017, ISBN: 978-1-138-29762-3 pp. 385 – 390.

38. Kupraty O. Mathematical modeling trajectory of a ship as a control object in global planning / O. Kupraty. – *Transport development.*, vol. 1, no. 6, 2020. – pp. 40-55.

39. Kurosawa K., Uchiyama Y., Kosako T. Development of a numerical marine weather routing system for coastal and marginal seas using regional oceanic and atmospheric simulations. *Ocean Engineering*. 2020. № 195. C. 24—36. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106706.

40. Kytariolou A, Themelis N. Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria. *Journal of Navigation*. 2022;75(6):1310-1331. doi:10.1017/S0373463322000613

41. Lazarowska A. Trajectory base method for ship's safe path planning / A. Lazarowska. – *Procedia Computer Science*, vol. 96, 2016. – pp.1022–1031, 201

42. Lee H., Choi H., Jeongseok L. Yang H., Generation of Ship's Passage Plan Using Data-Driven Shortest Path Algorithms. *IEEE Access*. 10. 126217-126231. 10.1109/ACCESS.2022.3225571.

43. Lee W.H. Visibility graph-based path-planning algorithm with quadtree representation / Lee W.H.; Choi G.H.; Kim T.W. – *Appl. Ocean Res.*, 2021, vol. 117, – pp. 1-13. doi.org/10.1016/j.apor.2021.102887

44. Li Y., Cui J., Zhang X., Yang X. A Ship Route Planning Method under the Sailing Time Constraint. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023.

Vol. 11 no 6. P. 1242-1240. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse11061242>

45. Li, X., Sun, B., Jin, J., Ding, J. (2022) Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading: turning point-time segmentation method. *J. Mar. Sci. Eng.*, Vol 10, P.1835-1856. DOI: 10.3390/jmse10121835

46. Liang C. Route planning and track keeping control for ships based on the leader-vertex ant colony and nonlinear feedback algorithms / C. Liang, X. Zhang, and X. Han. – *Appl. Ocean Res.*, vol. 101, 2020, doi.org/10.1016/j.apor.2020.102239

47. Lin Y., Fang M., Yeung R. A ship route planning method under the sailing time constraint. *Applied ocean research*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. №10. P. 1212. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10091212>

48. "Lin Y., Fang M., Yeung R. Weather routing model for ship motions reduction and fuel saving. *Technology and Science for the Ships of the Future*. 2022. №10. P. 1212. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10091212>"

49. Lisowski J. Analysis of methods of determining the safe ship trajectory / J. Lisowski – *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10, no. 2, 2016. – pp. 223-228,

50. Lisowski J. Synthesis of a Path-Planning Algorithm for Autonomous Robots Moving in a Game Environment during Collision Avoidance. *Electronics*. Vol.10(6), 2021. P. 675.

51. Lokukaluge P. Perera, C. Weather routing and safe ship handling in the future of shipping. *Ocean Engineering*. Vol. 130. 2017. C. 684-695. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.007>.

52. Mathematical modeling of the trajectory of a ship as a control object in local planning O. Kupraty // *Transport development*. vol. 339. – 2021. – pp. 1-13.

53. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Yaremenko N., Maliuha E., Honcharuk I., Shamov O. Innovative Technologies for the Maritime Industry: Hydrogen Fuel as a Promising Direction. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. №510, P. 23 -34. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351->

0\_3

54. MS11 - Nautical chart service - 14 June 2019
55. MS12 - Nautical publications service - 14 June 2019
56. MS15 - Real-time hydrographic and environmental information service
57. MS5 - Maritime safety information service - 14 June 2019
58. MSC.1/Circ. 1595. IMO Maritime Safety Committee: E-Navigation Strategy Implementation Plan – Update 1. (2018).
59. MSC.1/Circ.1610 - Initial Descriptions Of Maritime Services In The Context Of E-Navigation - 14 June 2019
60. Multi-objective vessel routing problems with safety considerations: A review / N. Sharif et al. *Maritime Transport Research*. 2024. Vol. 7. P. 100-122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.martra.2024.100122>.
61. Nash A. Any-angle path planning / Nash A., Koenig S. – *AI Mag.*, 2013, vol. 34, no. 4. – pp. 85–107.
62. NCSR 6/11/1. IMO Sub-Committee on Navigation, Communication and Search and Rescue. Revision of SOLAS Chapters III and IV for Modernization of the GMDSS, Including Related and Consequential Amendments to Other Existing Instruments. Submitted by Germany. IMO, London, 16 October 2018.
63. Niu H.L. Voronoi-visibility roadmap-based path planning algorithm for unmanned Surface vehicles / Niu H.L.; Savvaris A.; Tsourdos A.; Ji Z.J. – *Navig.*, 2019, vol 72. – pp. 850-874.
64. Noshokaty S. Ship routing and scheduling systems: forecasting, upscaling and viability. *Maritime Business Review*. 2021. Vol. 6, no. 1. P. 95—112. URL: <https://doi.org/10.1108/MABR-04-2020-0027>
65. Nosov, P., Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., Kruglyj, D. Navigation safety control system development through navigator action prediction by Data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.2, no 9(110), 2021. P. 55–68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>
66. Papanikolaou A., Zaraphonitis G., Bitner-Gregersen E., Shigunov V.,

Moctar O., Guedes Soares C., Reddy D., Sprenger F. Energy Efficient Safe SHip Operation (SHOPERA). Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 820—829. URL: <https://doi.org/10.1089/ther.2012.0001> (date of access: 06.05.2020).

67. Peeyee M., Rahman S., Hamid A., Zaki N, Zaki Z. Heuristic based model for groceries shopping navigator. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol.16(12), 2019 P. 932-940. DOI:10.11591/ijeecs.v16.i2.pp932-940

68. Ponomaryova V., Nosov P., Ben A., Popovych I., Prokopchuk Y., Mamenko P., Dudchenko S., Appazov E., Sokol I. Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 №3(127), 2024. P. 6-26.

69. R. Szlapczynski, J. Szlapczynska, R. Vettor Ship weather routing featuring w-MOEA/D and uncertainty handling. Applied Soft Computing. Vol. 138, 2023. 123-140pp. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110142.

70. Resalution .528(13) RECOMMENDATION ON WEATHER ROUTEING : Міжнародний правовий акт від 17.11.1983 : станом на 15 лют. 2023 р. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/A.528\(13\)%20\(1\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/A.528(13)%20(1).pdf) (дата звернення: 15.02.2023).

71. Resalution A.857(20) Guidelines for vessel traffic services : Міжнародний правовий акт від 27.11.1997 : станом на 15 лют. 2023 р. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/A.857\(20\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/A.857(20).pdf) (дата звернення: 15.02.2023).

72. Resalution A.893(21) Guidelines for voyage planning : Міжнародний правовий акт від 25.11.1999 : станом на 15 лют. 2023 р. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893\(21\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893(21).pdf) (дата звернення: 15.02.2023).

73. Research on Ship Route Planning Method Based on Neural Network

Wave Data Forecast / X. Jin et al. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 638. P. 012033. URL: [doi.org/10.1088/1755-1315/638/1/012033](https://doi.org/10.1088/1755-1315/638/1/012033)

74. Safety and Shipping Review 2024. Allianz. URL: <https://commercial.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html> (дата звернення: 11.11.2024).

75. Sen D. An approach for development of a ship routing algorithm for application in the north Indian ocean region / D. Sen, C.P. Padhy. – Appl. Ocean Res., vol 50, 2015. – pp. 173–191.

76. Shah B.C. Long-distance path planning for unmanned surface vehicles in complex marine environment / Shah B.C., Gupta, S.K. – J. Ocean. Eng., 2019, vol 45. – pp. 813-830.

77. Shi B. Obstacles modeling method in cluttered environments using satellite images and its application to path planning for USV / Shi B., Su Y., Zhang H., Liu J., Wan L. – Archit. Ocean Eng., 2018, vol. 11. – pp. 202-210.

78. Shikhopov V. P., Edvedev M. M., Ostjukov V. K., Oussein F. H., Adhim A. K. Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles. Informatics and Automation. Vol. 21 No. 3. 2022. pp. 459-488.

79. Singh Y., Sharma S., Sutton R., Hatton D., and A. Khan, A constrained A\* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents, Ocean Eng. Vol. 169, 2018. pp. 187–201.

80. Sprock T. Theory of discrete event logistics systems (DELS) specification / G. Thiers L. F. McGinnis, C. Bock // National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, 2020. 65 p.

81. Szlapczynska J. Multi-objective weather routing with customised criteria and constraints / J. Szlapczynska. – Navig., vol 68., 2015, – 338–354.

82. The United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) : Міжнародний правовий акт від 10.12.1982: станом на 15 лют. 2023 р. URL: <https://www.unclos.org> (дата звернення: 15.02.2023).

83. Tymochko O. Development of a Virtual Environment for Monitoring Underwater Electrical Cables by an Autonomous Underwater Vehicle Based on Fuzzy Cellular Automata / O. Tymochko, O. Sotnikov, S. Dudchenko, D. Makarchuk, A. Zazirnyi, O. Kolodiazhnyi // *Problemele energeticii regionale*. 2024. Vol. 3(63). C. 130-145.

84. Ulsrud K., Vandvik A., Ormevik A., Fagerholt K., Meisel F. A time-dependent vessel routing problem with speed optimization. *European Journal of Operational Research*. 2022. № 303. C. 891—907. DOI: 0.1016/j.ejor.2022.03.015.

85. van Westrenen, F., & Praetorius, G. (2014). Maritime traffic management: A need for central coordination?. *Cognition, Technology and Work*. Vol 16(1), P. 59–70. URL: <https://doi.org/10.1007/s10111-012-0244-5>

86. Vettor R. Development of a ship weather routing system / Vettor R.; Guedes Soares C. – *Ocean Eng.*, 2016, vol 123. – pp. 1-14.

87. Vettor R., Szlapczynska J., Szlapczynski R., Tycholiz W. Towards Improving Optimised Ship Weather Routing. *Polish Maritime Research*. Vol. 27, No 1(105). 2020. C. 60-69. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0007>

88. Walther L. Development of a weather routing system for analysis and optimization of ship voyages. Hamburg: Fraunhofer verlag, 2020. 225 c.

89. Wang F., Yan X., Wang Y Ship domain model for multi-ship collision avoidance decision-making with colregs based on artificial potential field. *The international journal on marine navigation and safety of sea transportation*. Vol. 11, no 1, 2017. P. 85-92.

90. Wang H., Mao W., Eriksson L. Efficiency of a voluntary speed reduction algorithm for a ship's great circle sailing. *International journal on marine navigation and safety of sea transportation*. 2021. Vol. 14, no. 2. P. 301—308. URL: <https://doi.org/10.12716/1001.14.02.04>.

91. Xing Y., Yang H., Ma X., Zhang Y. Optimization of ship speed and fleet deployment under carbon emissions policies for container shipping. 2019. Vol. 34, Iss. 2. P. 260—274. URL: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.9317>

92. "Yang J., Wu L., Zheng J. Multi-objective weather routing algorithm for ships: the perspective of shipping company's navigation strategy. The Perspective of Shipping Company's Navigation Strategy. J. Mar. Sci. Eng. 2022. №10. P. 1212. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10091212>"

93. Zhang S.-K. , Shi G.-Y. , Liu Z.-J., Zhao Z.-W., Wu Z.-L. Data-driven based automatic maritime routing from massive AIS trajectories in the face of disparity. Ocean Eng. Vol. 155, 2018. pp. 240-250.

94. Zhang Y., Wen Y., Tu H. A Method for Ship Route Planning Fusing the Ant Colony Algorithm and the A\* Search Algorithm. IEEE Access. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3243810>.

95. Zinchenko S.M., Mateichuk V.M., Nosov P.S., Popovych I.S., Appazov E.S. Improving the accuracy of automatic control with mathematical meter model in on-board controller // Radio Electronics, Computer Science, Control. № 4. 2020. – P. 197-207. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-19>

96. Zis T., Psaraftis H., Ding L. Ship weather routing: A taxonomy and survey. Ocean Engineering. Vol. 213. 2020. C. 10-7. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107697>

97. Życzkowski M., Szłapczyńska J., Szłapczyński R. Review of weather forecast services for ship routing purposes. Polish maritime research. 2019. №4 (104). P. 80—89. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0069>.

98. Алейніков М. В. Моделі і методи ефективного судноводіння з використанням інструментального методу навігації на річці Дніпро : дис. ... канд. техн. наук. : 271. Київ, 2020. 286 с.

99. Вагущенко Л.Л. Точность и надежность стабилизации судна на маршруте дискретными корректировками курса : дис. ... докт. техн. наук. : 05.22.16. Одеса, 1993. 225 с.

100. Г.В. Шапіро, О.О. Аросланкін, Є.Є. Постніков. Формування інформаційної моделі надводної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт. Том 3 №65. 2021. Системи управління, навігації та зв'язку. doi:

10.26906/SUNZ.2021.3.037

101. Ганношина І.М. Метод автоматизованого визначення маршруту при плануванні переходу засобів водного транспорту : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.13. Кропивницький, 2019. 153 с.

102. Голюков В. А. Підвищення ефективності та оптимізація руху суден при маневруванні : дис. ... докт. техн. наук. : 05.22.13. Одеса, 2020. 291 с.

103. Грібова В.В., Перстньова В.В., Сікіраш Ю.Є. Теорія ймовірностей : Навчальний посібник,. Одеса: Держ. ун-т «Одеська політехніка», 2022. 176 с.

104. Дудченко С. В., Макарчук Д. В., Литовченко В. І., Ісайчев А. Г., Жмур В. М. Метод оптимізації безпечного маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов та ефективного використання палива : XVI міжнар. наук.-практ. конф. — Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) : тези доп., 29-31 трав.. 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 299–202.

105. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден. Водний транспорт. №3(38), 2023. С. 277-286.

106. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна. Вісник приазовського державного технічного університету. Вип. 47, 2023. С. 305-312.

107. ЄС-TWBC 2019/1. Європейський стандарт що встановлює технічні вимоги до суден внутрішнього плавання. Чинний від 2023-11-23. Вид. офіц. Страсбург: CESNI, 2023. 530 с.

108. Желєзна Т., Драгнєв С. Аналіз перспектив використання біопалив на морському транспорті. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2024. №3(6). P. 75—87.  
URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.07>.

109. Зазірний А.А.Методи формалізації процесу управління судном для

підвищення ефективності функціонування суднових ергатичних систем зі зміною структурою : дис. ... докт. філософії. : 271. Київ, 2021. 181 с.

110. Зазірний, А.А. Метод формування динамічного простору рівнів небезпеки зон в районі плавання при вирішенні задачі розходження судна з навігаційними небезпеками. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Vol. 1(67). 2021 . С. 110-118. DOI: 10.30748/zhups.2021.67.15

111. Забара І. М. Судноплавство міжнародне торговельне // Українська дипломатична енциклопедія : у 2 т. / ред. кол.: Л. В. Губерський (голова) та ін. — К. : Знання України, 2004. — Т. 2 : М — Я. — 812 с. — ISBN 966-316-045-4.

112. Інституціональне забезпечення функціонування виробничої інфраструктури України : колективна монографія / за ред. О.І. Никифорук ; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». К., 2021.— 400 с.

113. Калініченко Є., Постников Є. Метод оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у системі управління безпекою судноплавства. Водний транспорт. 2023. С. 20—29. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.02>

114. Каспрук О. С. Еволюція міжнародно-правового регулювання міжнародних транспортних коридорів : дис. ... канд. техн. наук. : 12.00.11. Київ, 2019. 237 с.

115. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за ред. В. Чимшира / Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.

116. Кольцова Я. І., Нікітін С. В. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку морських вантажних перевезень в Україні та світі. Економічний вісник НТУУ "Київський політехнічний інститут". 2023. № 25. С. 59-64. DOI: 10.20535/2307-5651.25.2023.27860.

117. Кульбацький А. А. Підвищення ефективності судноводіння на

водних шляхах України з застосуванням сучасних інформаційних технологій : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.13. Одеса, 2021. 292 с.

118. Мальцев А.С. Теорія і практика безпечного управління судном при маневруванні : дис. ... докт. техн. наук : 05.22.16. Одеса, 2007. 386 с.

119. Маменко П.П. Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності : дис. ... докт. філософії. : 151. Херсон, 2023. 179 с.

120. Масік І. П. Метод підвищення ефективності навігації засобу водного транспорту у складних умовах : дис. канд. техн. наук : 05.22.13. Кропивницький, 2019. 166 с.

121. Мельник О.М. Експлуатація неспеціалізованих суден при транспортуванні негабаритних і великовагових вантажів : дис. канд. техн. наук : 05.22.20. Одеса, 2021. 129 с.

122. Мельник, О.В., Романюк, О.Н., Котлик, С.В., Романюк, С.О. Чехмestрук, Р.Ю. (2022) Методи підвищення продуктивності формування векторів на гексагональному растрі. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Vol. 14, Is. 3, P.28-39.

123. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія / В.В. Аулін, А.В. Гриньків, А.О. Головатий та ін. ; під заг. ред. В.В. Ауліна. – Кропивницький, 2020, – 428 с.

124. Міжнародна конвенція про охорону людського життя на морі 1974 року (СОЛАС-74) : Міжнародний правовий акт від 01.11.1974 : станом на 15 лют. 2023 р. URL: <https://marad.gov.ua/ua/npa/mizhnarodna-konvenciya-pro-ohoronu-lyudskogo-zhittya-na-mori-1974-roku-solas-74> (дата звернення: 15.02.2023).

125. Мітін Ю. ЕРГОНОМІЧНІ АСПЕКТИ І РЕСУРСИ НАВІГАЦІЙНОГО МІСТКА ТА ЇХ ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ СУДНОПЛАВСТВА. Grail of Science. 2022. № 12-13. С. 332–338. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.056>

126. Позолотін Л. А., Торський В.Г., Любченко В. І. Міжнародні конвенції, кодекси, рекомендації ІМО та МОП. Одеса : Астропринт, 2007. 146 с.

127. Про визначення національного координатора навігаційних попереджень та затвердження Положення про нього : Наказ Міністерства транспорту України від 16.04.2004 № 420: станом на 16.04.2024 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0870-01#Text> (дата звернення: 10.07.2024).

128. Про внутрішній водний транспорт : Закон України від 03.12.2020 № 1054-IX : станом на 15.11.2024 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text> (дата звернення: 20.11.2024).

129. Про затвердження Інструкції про порядок здійснення контролю за виконанням судноплавними компаніями України нормативних актів з питань безпеки судноплавства : Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 26.11.2004 № 1048: станом на 11.09.2018 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1584-04#o1> (дата звернення: 01.07.2023).

130. Про затвердження Інструкції про порядок надання інформації в Міністерстві інфраструктури при виникненні надзвичайних ситуацій у сфері транспорту, дорожнього господарства, туризму та інфраструктури : Наказ Міністерства інфраструктури України від 26.03.2012 № 186: станом на 26.03.2012 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0541-12#n2> (дата звернення: 01.07.2023).

131. Про затвердження переліку внутрішніх морських вод і внутрішніх водних шляхів, віднесених до категорії судноплавних : Постанова Каб. Міністрів України від 09.02.2022 № 136: станом на 10.02.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/136-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.02.2024).

132. Про затвердження Положення про класифікацію, порядок розслідування та обліку аварійних морських подій із суднами : Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 29.05.2006 № 516: станом на

10.03.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0959-06#o1> (дата звернення: 01.07.2023).

133. Про затвердження Положення про навігаційно-гідрографічне забезпечення мореплавства у внутрішніх морських водах, територіальному морі та виключній (морській) економічній зоні України : Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 29.05.2006 № 514: станом на 21.09.2018 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0708-06#n2> (дата звернення: 01.07.2023).

134. Про затвердження Положення про річкову інформаційну службу : Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 30.05.2023 № 462: станом на 01 лип. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1187-23#Text> (дата звернення: 01.07.2023).

135. Про затвердження Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті : Наказ Міністерства транспорту України від 20.11.2003 № 904: станом на 11.09.2018 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1193-03#Text> (дата звернення: 10.07.2024).

136. Про затвердження Правил контролю суден з метою забезпечення безпеки мореплавства : Наказ Міністерства транспорту України від 17.07.2003 № 545: станом на 10.03.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0353-04#Text> (дата звернення: 01.07.2023).

137. Про затвердження Правил судноплавства на внутрішніх водних шляхах України : Наказ Міністерства транспорту України від 16.02.2004 № 91: станом на 20.12.2022 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0872-04#Text> (дата звернення: 01.07.2023).

138. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Каб. Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р: станом на 03.05.2023 р. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#n2> (дата звернення: 15.02.2024).

139. Про утворення Державної служби морського та річкового транспорту України : Постанова Каб. Міністрів України від 06.09.2017 № 1095: станом на 07.03.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1095-2017-%D0%BF#n2> (дата звернення: 15.02.2024).

140. Січко Т., Нескородєва Т., Римар П. Методи та моделі прийняття рішень в умовах невизначеності. Комп'ютерні системи та інформаційні технології. 2021. № 3. С. 47—51. DOI: 10.31891/CSIT-2021-5-6.

141. Соколенко В.І. Вдосконалення методів планування шляху і управління судном в стислих водах : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.13 Одеса, 2019. 214 с.

142. Стан безпеки судноплавства та аварійності із суднами на морському та внутрішньому водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за 2022 рік з наростаючим підсумком. Державна служба морського та річкового транспорту України. URL: [https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit\\_avariynosti\\_2\\_2024.pdf](https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit_avariynosti_2_2024.pdf) (дата звернення: 11.11.2024).

143. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за січень – червень 2024 року з наростаючим підсумком. Державна служба морського та річкового транспорту України. URL: [https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit\\_avariynosti\\_2\\_2024.pdf](https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit_avariynosti_2_2024.pdf) (дата звернення: 11.11.2024).

144. "Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за січень – грудень 2023 року з наростаючим підсумком. Державна служба морського та річкового

транспорту України. URL: [https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit\\_avariynosti\\_2\\_2024.pdf](https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit_avariynosti_2_2024.pdf) (дата звернення: 11.11.2024)."

145. Тимощук О. М. Метод аналізу навігаційних ситуацій для запобігання зіткнення суден і підвищення безпеки судноплавства : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.13. Кропивницький, 2019. - 171 с.

146. Цимбал М.М. Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису : дис. ... докт. філософії : 271 Одеса, 2021. 183 с.

147. Шапіро Г.В., Горалік Є.Т. Моделі та метод формалізації навігаційної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. Водний транспорт: Збірник наукових праць. Том 3(34). 2021. С. 57-66. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.07

148. Шишкін О. В. Інтегрування систем морського радіозв'язку і навігації в рамках розвитку концепції е-Навігації : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.13 Одеса, 2021. 351 с.

149. Шумілова К.В. Удосконалення планування і управління навігаційними ризиками рейсового циклу судна : дис. ... докт. філософії. : 271 Одеса, 2023. 307 с.

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор ХДМА з НПР к.т.н.,  
професор

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

ДУДЧЕНКО Сергій Валерійовича

на тему

«Методи та моделі підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу»

в освітньому процесі Херсонської державної морської академії

Ми, що нижче підписалися, Нагрибельний Я.А., Товстокорий О.М., Петровський А.В. склали цей акт в тому, що результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії здобувача Дудченко С.В. на тему «Методи та моделі підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу» впроваджені в освітній процес, факультету судноводіння на кафедрі судноводіння при викладанні освітніх компонент «Навігація і лоція» та «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти – математична модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек.

Декан факультету

Судноводіння

д.п.н, професор Ярослав НАГРИБЕЛЬНИЙ

Завідувач кафедри

Управління судном

к.т.н., доцент Олег ТОВСТОКОРИЙ

Заступник завідувача кафедри

Судноводіння

к.т.н., доцент Андрій ПЕТРОВСЬКИЙ



Марлоу Навігація Україна

Вул. Троцька, 45

65045, Одеса

Україна

Т: +380 48 734 08 00

Ф: +380 482 429 383

E-mail: marlow@marlow.od.ua

Web: marlow-navigation.com

## Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

Товариство з обмеженою відповідальністю «Marlow Navigation Ukraine» засвідчує, що результати дисертаційної роботи на тему «Методи та моделі підвищення навігаційної безпеки суден під час планування переходу» аспіранта, капітана далекого плавання ДУДЧЕНКО Сергій Валерійовича впроваджені в практичну діяльність судноплавної компанії «Marlow Navigation Ukraine». Дане впровадження було виконано у процесах підвищення безпеки судноплавства через імплементацію методу формування безпечного оптимального маршруту переходу суден, оптимального щодо витрати палива, що дозволило забезпечити мінімальні витрати палива.

Генеральний директор

Marlow Navigation Ukraine  КДП Борис ЕЗРІ

Заступник директора з тренінгів

Marlow Navigation Ukraine  КДП Сергій САГЛІО

Старший механік

Marlow Navigation Ukraine  СМХ В'ячеслав ФЕДЧУК

## Список опублікованих праць

*Основні наукові результати**Публікації, що проіндексовані у базах даних Scopus*

1. Tymochko O. Development of a Virtual Environment for Monitoring Underwater Electrical Cables by an Autonomous Underwater Vehicle Based on Fuzzy Cellular Automata / O. Tymochko, O. Sotnikov, S. Dudchenko, D. Makarchuk, A. Zazirnyi, O. Kolodiazhnyi // *Problemele energeticii regionale*. – 2024. – 3(63) – С. 130-145. (Внесок автора: розроблено метод синтезу Парето-оптимального маршруту судна, що забезпечує мінімальну витрату палива за мінімальний час обстеження кабелю і задовольняє заданій системі обмежень).

2. Dudchenko S. Application of fuzzy cellular automata to optimize a vessel route considering the forecasted hydrometeorological conditions / S. Dudchenko, O. Tymochko, D. Makarchuk, A. Golovan // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 1 №3(127) – С. 28-37 (Внесок автора: розроблено метод побудови оптимального за витратою палива при заданому рівні безпеки для судна і вантажу маршруту руху судна).

3. Ponomaryova V. Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions / Ponomaryova V., Nosov P., Ben A., Popovych I., Prokopchuk Y., Mamenko P., Dudchenko S., Appazov E., Sokol I. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 1 №3(127) – С. 6-26 (Внесок автора: запропоновано формально-логічну модель виявлення інтуїтивних дій судноводія-оператора).

*Публікації у фахових виданнях категорії «Б»*

4. Plotnikov V. I. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex / S. V. Dudchenko, G. S. Abramov, D. V. Makarchuk // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2023. – № 1–2 (26–27) – С. 82-95 (Внесок автора: проведено оцінку ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу та їх моделювання).

5. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги провідки та планування оптимального маршруту переходу суден / С.В. Дудченко // Водний транспорт. – 2023. – №3(38). – С. 277-286.

6. Дудченко С.В. Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна / С.В Дудченко // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2023. – Вип. 47 – С. 305-312.

*Апробація наукових результатів*

7. Дудченко С. В., Макарьчук Д. В., Литовченко В. І., Ісайчев А. Г., Жмур В. М. Метод оптимізації безпечного маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов та ефективного використання палива : XVI міжнар. наук.-практ. конф. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) : тези доп., 29-31 трав.. 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 299–202.

8. Дудченко С. В., Оптимізація маршруту суден з урахуванням безпеки та прогнозу погоди, матеріали VIII Міжнародної наукової конференції «Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Дрогобоич, Україна, С. 313-320

9, Дудченко С. В., Удосконалення моделі планування смуги провідки та маршрутів суден, матеріали VII International Scientific and Theoretical

Conference «Scientific forum: theory and practice of research», тези доп., 31 січня 2025 року, м. Валенсія, Іспанія, С. 176-181.

