

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ФУКЛЄВ ОЛЕГ ІВАНОВИЧ

УДК 629.5.072.4.001.9

ДИСЕРТАЦІЯ
ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ МАНЕВРУВАННЯ
СУДНА У СТИСНЕНИХ ВОДАХ

Спеціальність: 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань: 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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

_____ О.І. Фуклєв

Науковий керівник: Ганношина Ірина Миколаївна
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Фуклев О.І. Знання-орієнтовані методи підтримки маневрування судна у стиснених водах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 271 – Морський та внутрішній водний транспорт. – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання з розробки ефективних знання-орієнтованих методів підтримки маневрування суден у стиснених водах.

Значний ступінь аварійності світового флоту визначає необхідність вирішення проблем безпеки мореплавання. Найбільш поширеною причиною аварійності (до 80% випадків) є проблема «людського фактору». Для удосконалення процесів забезпечення безпеки плавання розробляються системи підтримки прийняття рішення судноводіння. Вони здатні надавати судноводієві прогнозовані пропозиції з використанням знання-орієнтованих технологій, що відповідають особливостям мислення людини. Підвищення ефективності систем управління рухом судна досягається застосуванням адаптивних систем, що самоналаштовуються під змінні умови плавання, що передбачає логічне скорочення аварійних ризиків у судноводінні.

Маневрування суден у стиснених водах є одним з найбільш складних видів маневру, оскільки, на відміну від відкритої акваторії, на судно діє значно більша кількість факторів, що вимагає від судноводія їх врахування.

Для забезпечення безпеки руху судна ряд функцій судноводія передаються автоматичним системам судноводіння. Одним із найважливіших завдань при побудові систем автоматичного управління судном є прогнозування руху при маневруванні та формування програмних управлінь у заданий проміжок часу.

Для цього застосовуються методи та алгоритми сучасної теорії управління із застосуванням ідентифікації моделей та адаптації процесів управління суднами. При адаптивному підході модель об'єкта та процесів управління в тій чи іншій формі однозначно формується за наслідками реального руху. Проведення активного експерименту для побудови моделі об'єкта, як правило, є складним з точки зору безпеки та високих матеріальних витрат. Тому це виключає можливість застосування багатьох відомих методів ідентифікації об'єктів. Побудова систем підтримки прийняття рішень у судноводінні на основі методів моделювання, ідентифікації моделей та адаптації управління дозволяє мінімізувати втручання дослідника в роботу системи управління і визначає актуальність дисертаційної роботи.

Отже, очевидно, об'єктивно існують невідповідності:

по-перше, між складністю процесів маневрування у стиснених водах, пов'язаних зі збільшення інтенсивності судноплавства, з одного боку, та відсутністю достатньо ефективних методів врахування факторів, які впливають на рух суден, з іншого;

по-друге, між стрімким розвитком знання-орієнтованих технологій та технологій штучного інтелекту (ШІ), удосконаленням апаратних засобів, з одного боку, та відсутністю методів підтримки маневрування судна у стиснених водах, з іншого.

Дані невідповідності вимагають вирішення вказаного наукового завдання.

Метою дослідження є підвищення обґрунтованості та оперативності прийняття рішення судноводієм на маневрування у стиснених водах за рахунок впровадження знання-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень.

Поставлена мета досягається *вирішенням* таких *часткових завдань*:

- Аналіз методів управління режимами руху судна при маневруванні.

- Аналіз знання-орієнтованих моделей та методів систем підтримки прийняття рішення судноводіння.

- Розроблення моделі маневреності судна у стиснених водах та на мілководді.
- Ідентифікація моделі та розробка методу адаптивного управління маневруванням судна у стиснених водах.
- Оцінка ефективності розроблених методів та розробка рекомендацій щодо їх впровадження.

За об'єкт дослідження розглядаються процеси маневрування суден у стиснених водах.

Предметом дослідження є знання-орієнтовані моделі і методи підтримки маневрування суден у стиснених водах у складі систем підтримки прийняття рішення судноводінням.

Поставлені у дисертаційній роботі завдання вирішені із використанням таких *методів дослідження*:

- *системного аналізу* – для аналізу предметної області та обґрунтування методів управління рухом суден при маневруванні у стиснених водах;
- *побудови моделей штучного інтелекту* – для розроблення апаратно-програмного комплексу ідентифікації надводної обстановки;
- *теорії побудови систем підтримки прийняття рішення* – для побудови системи підтримки прийняття рішень забезпечення безпеки судноводіння у стиснених водах;
- *математичного моделювання* – для визначення траєкторій руху суден у стиснених водах;
- *теорії ймовірності* – для проведення моделювання й оцінювання його результатів під час апробування роботи системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

Наукова новизна отриманих результатів дисертації полягає в такому:

1. *Удосконалено* модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у

методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

2. *Отримала подальший розвиток* модель розходження суден у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є елементом системи підтримки прийняття рішень судноводіння та дозволяє підвищити безпеку судноводіння.

3. *Удосконалено* адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від відомих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується грамотною постановкою наукового завдання дослідження, комплексним використанням відомих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, математичного моделювання, теорії ймовірності, побудови моделей штучного інтелекту, теорії побудови систем підтримки прийняття рішення на етапах моделювання й аналізу результатів досліджень, збігом отриманих результатів з відомими експериментальними даними у даній предметній області, відкритим обговоренням результатів на наукових семінарах і конференціях і їх публікацією у рекомендованих наукових виданнях, впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність ТОВ НТЦ «Флагман».

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ судноводіння у стиснених водах шляхом розробки систем підтримки прийняття рішення судноводіння.

Практичне значення отриманих результатів полягає у подальшому полягає у подальшому вдосконаленні знання-орієнтованих моделей і методів системи підтримки прийняття рішення судноводіння, що дозволяють підвищити ефективність та безпеку маневрування у стиснених водах.

Використання наукових та прикладних результатів досліджень.

Запропоновані теоретичні методи мають високий ступінь готовності до використання і доведені до їх практичної реалізації. Застосування розроблених методів дозволяє підвищити своєчасність (оперативність) вироблення рішень порівняно з неавтоматизованим способом на 19–26%. Збільшення кількості чинників, урахуваних й оброблених за допомогою запропонованих методів у порівнянні з відомими, дозволяють за наявний час збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 23%.

Отримані в дисертації результати доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень судноводіння й елементів спеціального математичного та програмного у частині маневрування у стиснених водах та на мілководді; у науково-дослідних організаціях – для дослідження процесів безпеки судноводіння у стиснених водах; у закладах вищої освіти – з метою вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Основні положення дисертаційної роботи реалізовані:

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах використовуються в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій, факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» (акт № 07/01-11 від 07.01.2025 року);

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння. (акт ТОВ НТЦ Флагман від 19.12.2024 року).

В роботі показаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами, обґрунтована наукова новизна отриманих результатів, відмічений вклад

дисертанта в наукові роботи, які написані у співавторстві.

Ключові слова: судноводіння, безпека судноплавства, безпека судноводіння, безпека на морі, безпека маневрування, навігація, судно, стиснені води, попередження зіткнення суден, маневрування, маршрут судна, метод управління, морський транспорт, система підтримки прийняття рішення, технічні системи, технічні засоби, судновий комплекс, нейронна мережа, траєкторія руху суден, рух судна.

ABSTRACT

Fuklyev O.I. Knowledge-Oriented Methods for Supporting Ship Maneuvering in Confined Waters – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 271 Maritime and Inland Water Transport. – State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2025.

This dissertation addresses the pressing scientific challenge of developing effective knowledge-oriented methods for supporting ship maneuvering in confined waters.

The significant rate of accidents in the global fleet necessitates addressing maritime safety issues. The most common cause of accidents (up to 80% of cases) is the «human factor». To improve safety processes, ship navigation decision support systems are being developed. These systems can provide the navigator with predictive suggestions using knowledge-oriented technologies that align with human thinking. Enhancing the efficiency of ship motion control systems is achieved through the use of adaptive systems that self-adjust to changing navigation conditions, thereby logically reducing accident risks in ship navigation.

Maneuvering ships in confined waters is one of the most complex types of maneuvers because, unlike in open water, the ship is affected by a significantly larger number of factors, requiring the navigator to consider them.

To ensure safe ship movement, some of the navigator's functions are transferred to automatic navigation systems. One of the most critical tasks in building automatic ship control systems is predicting movement during maneuvering and generating control programs within a specified time frame.

For this purpose, methods and algorithms of modern control theory are used, including model identification and adaptation of ship control processes. In the

adaptive approach, the object model and control processes are uniquely formed based on real movement outcomes. Conducting active experiments to build an object model is generally complex in terms of safety and high material costs. Therefore, this excludes the possibility of using many known object identification methods. Building decision support systems in ship navigation based on modeling, model identification, and control adaptation methods minimizes researcher intervention in the control system, highlighting the relevance of this dissertation.

Thus, it is evident that objective inconsistencies exist:

- firstly, between the complexity of maneuvering processes in confined waters, associated with increased shipping intensity, and the lack of sufficiently effective methods to account for factors affecting ship movement;
- secondly, between the rapid development of knowledge-oriented and artificial intelligence (AI) technologies, hardware improvements, and the lack of methods to support ship maneuvering in confined waters.

These inconsistencies require the resolution of the stated scientific problem.

The aim of the research is to enhance the validity and efficiency of the navigator's decision-making during maneuvering in confined waters by implementing knowledge-oriented decision support systems.

This aim is achieved by addressing the following specific tasks:

- Analysis of ship motion control methods during maneuvering.
- Analysis of knowledge-oriented models and methods for ship navigation decision support systems.
- Development of a ship maneuverability model in confined and shallow waters.
- Identification of the model and development of an adaptive control method for ship maneuvering in confined waters.
- Evaluation of the effectiveness of the developed methods and development of recommendations for their implementation.

The object of the research is the processes of ship maneuvering in confined waters.

The subject of the research is knowledge-oriented models and methods for supporting ship maneuvering in confined waters as part of ship navigation decision support systems.

The tasks set in the dissertation are solved using the following research methods:

- system analysis – for analyzing the subject area and substantiating ship motion control methods during maneuvering in confined waters;
- artificial intelligence model building – for developing hardware and software for identifying the surface situation;
- decision support system building theory – for building a decision support system to ensure safe ship navigation in confined waters;
- mathematical modeling – for determining ship movement trajectories in confined waters;
- probability theory – for modeling and evaluating its results during the testing of the ship navigation decision support system.

The scientific novelty of the dissertation's results lies in the following:

1. An improved ship maneuvering model in shallow and confined waters, which, unlike existing models, accounts for mud rheology and internal wave generation at the water-mud interface, enhancing the descriptive capabilities of ship maneuvering for use in recognition methods based on artificial neural networks within the ship navigation decision support system.
2. Further development of a ship divergence model in confined waters, which, unlike existing models, accounts for hydrodynamic interaction between ships, is an element of the ship navigation decision support system, and enhances navigation safety.
3. An improved adaptive method for ship maneuvering control in shallow water, which, unlike existing methods, is based on the use of a dynamic motion control system and allows for increasing the accuracy of the tunable ship control coefficients in confined and shallow waters for automatic control and decision

support systems.

The validity and reliability of the scientific propositions, conclusions, and recommendations are confirmed by the sound formulation of the research problem, the comprehensive use of known, practically proven theoretical and empirical research methods, namely system analysis, mathematical modeling, probability theory, artificial intelligence model building, and decision support system building theory at the stages of modeling and analysis of research results, the convergence of the obtained results with known experimental data in this subject area, open discussion of the results at scientific seminars and conferences and their publication in recommended scientific journals, and the implementation of the dissertation research results in the production activities of Flagman Research and Production Center LLC.

The scientific significance of the work lies in the further development of the theoretical and applied foundations of ship navigation in confined waters by developing ship navigation decision support systems.

The practical significance of the obtained results lies in the further improvement of knowledge-oriented models and methods of the ship navigation decision support system, which enhance the efficiency and safety of maneuvering in confined waters.

Use of research and applied results: The proposed theoretical methods have a high degree of readiness for use and have been brought to their practical implementation. The application of the developed methods allows to increase the timeliness (efficiency) of decision-making compared to the non-automated method by 19–26%. Increasing the number of factors taken into account and processed by the proposed methods compared to the known ones allows to increase the coefficient of completeness of factors accounting by 23% within the available time.

The results obtained in the dissertation should be used in the development of ship navigation decision support systems and elements of special mathematical and software in terms of maneuvering in confined and shallow waters; in research

organizations – to study the processes of safe navigation in confined waters; in higher education institutions – to improve the system of training specialists in the specialty of maritime and inland water transport.

The main provisions of the dissertation are implemented:

- The ship maneuvering model in shallow and confined waters is used in the educational process of the State University of Infrastructure and Technologies, Faculty of Navigation, Department of Navigation and Ship Control, in teaching the disciplines «Ensuring Navigational Safety of Navigation» and «Ship Seakeeping Management» (act №. 07/01-11 dated 07.01.2025);
- The ship maneuvering model in shallow and confined waters, which takes into account the rheology of silt and the generation of internal waves in the "water-silt" interface, which allows to increase the descriptive possibilities of ship maneuvering for its application in recognition methods based on artificial neural networks of the ship navigation decision support system. (act of Flagman Research and Production Center LLC dated 18.12.2024).

The work shows the connection of the work with scientific programs, topics, substantiates the scientific novelty of the obtained results, and notes the contribution of the dissertation to scientific works written in co-authorship.

Keywords: navigation, navigation safety, navigation safety, safety at sea, maneuvering safety, navigation, ship, compressed waters, collision prevention of ships, maneuvering, ship route, control method, maritime transport, decision support system, technical systems, technical means, ship complex, neural network, ship motion trajectory, ship motion.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Фуклев О., Ярмак В. Метод управління маневруванням судна на мілководді. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. № 1(42). С. 147–155. Doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.18
2. Фуклев О., Вечурко О. Знання-орієнтовані технології прийняття рішень під час руху суден у стиснених водах. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2024. Т. 2, № 49. С. 178–185. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321392>
3. Фуклев О., Євтушенко М. Моделі розходження суден у стиснених водах. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2024. № 3 (41). С. 159–166. Doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.18 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/381/337>
4. Фуклев О., Маслов І. Дослідження моделі та методи розрахунку гідродинаміки судна на хвилюванні. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2022. № 2(36). С. 150–165. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.12 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/238>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. Фуклев О.І, Нікітін П.В., Шапіро Г.В. Дослідження особливості маломірного судна та системи управління його рухом// Дніпровські читання-2022: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 8 грудня 2022 р., м. Київ, 2022. С. 66-71.
6. Фуклев О.І., Гороховська О.К. Знання-орієнтовані моделі та методи систем підтримки прийняття рішення судноводіння// Дніпровські читання-2024: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 5 грудня 2024 р., м. Київ, 2024. С. 58-61.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	16
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН.....	25
1.1 Аналіз методів управління режимами руху судна при маневруванні	25
1.2 Аналіз методів планування траєкторії та рухів суден	40
1.3 Аналіз знанняорієнтованих моделей та методів систем підтримки прийняття рішення судноводіння	45
Висновки до розділу 1.....	51
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ МАНЕВРЕНОСТІ СУДНА У СТИСНЕНИХ ВОДАХ ТА НА МІЛКОВОДДІ.....	53
2.1 Дослідження маневреності судна на мілководді	53
2.2 Моделі сил на корпусі та кермі судна під час маневрування на мілководді ...	57
2.2.1 Сили на корпусі судна	57
2.2.2 Сили на кермі судна.....	59
2.3 Дослідження маневреності судна у стиснених водах.....	61
2.4 Розроблення моделі маневрування судна на мілководді та у стиснених водах.....	67
2.5 Розроблення моделі розходження суден у стиснених водах	75
2.5.1 Модель суден, що рухаються паралельними курсами у стиснених водах	76
2.5.2 Модель обгону суден у стиснутих водах.....	77
2.5.3 Модель взаємодії з пришвартованими суднами	80
2.5.4 Модель поповнення запасів на суднах у стиснених водах	82
2.5.5 Модель взаємодії буксира з судном	83
Висновки до розділу 2	86
РОЗДІЛ 3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МАНЕВРУВАННЯМ СУДНА У СТИСНЕНИХ ВОДАХ.....	87

3.1 Зміст ідентифікації моделі управління маневруванням судна	87
3.2 Структурна ідентифікація моделі управління маневруванням судна у стиснених водах та на мілководді	90
3.3 Параметрична ідентифікація моделі управління маневруванням судна у стиснених водах та на мілководді	96
3.4 Оцінювання методу ідентифікації моделей руху судна у стиснених водах	98
3.5 Адаптивний метод управління маневруванням судна у стиснених водах за критерієм узагальненої роботи	111
Висновки до розділу 3.	122
4 РОЗРОБЛЕННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ РУХУ СУДНА ПРИ МАНЕВРУВАННІ У СТИСНЕНИХ ВОДАХ	123
4.1 Формування набору навчальних даних для прогнозування динаміки руху судна при маневруванні у стиснених водах.....	123
4.2 Тестування нейромережових (нейро-нечітких) систем для прогнозування динаміки руху судна при маневруванні у стиснених водах	131
4.3 Дослідження надійності системи підтримки прийняття рішення судноводінням, побудованої на основі знанняорієнтованих технологій	136
4.4. Оцінка ефективності удосконаленого методу	140
Висновки до розділу 4.	146
ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТКИ.....	164

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ARX	– авторегресійні моделі;
ML	– machine learning (машинне навчання);
NLARX	– нелінійні авторегресійні моделі;
NLHW	– нелінійні моделі Гаммерштайна-Віннера;
RPMM	– roll planar motion mechanism (механізм плоскопаралельного руху ролика);
STBL	– ship to be lightered (судно, яке підлягає обслуговуванню);
UKC	– ship's under-keel clearance (глибина під килем);
UNREP	– underway replenishment (маневр для поповнення запасів);
VOSS	– Vessel Optimization and Safety System (система оптимізації та безпеки судна);
АКОР	– аналітичне конструювання оптимальних регуляторів;
АСКМ	– автоматизована система контролю мореплавності;
ГД	– гідродинамічна;
ГДХ	– гідродинамічні характеристики;
ГЗУ	– головні засоби управління;
ГС	– гідрометеорологічна ситуація;
ДЗУ	– допоміжні засоби управління;
ЗВ	– збурюючі впливи;
КУР	– критерій узагальненої роботи;
ЛШ	– лінія шляху;
НМ	– нейрона мережа;
НМЗП	– нейронна мережа зі зворотним поширенням;
НМПП	– нейронна мережа з прямим поширенням;
НО	– навігаційна обстановка;
НС	– навігаційна ситуація;

РКК	– рушійно-кермовий комплекс;
РЛС	– радіолокаційна станція;
САУ	– система автоматичного управління;
СКП	– середньоквадратична помилка;
СППР	– система підтримки прийняття рішення;
ТЗП	– точка закінчення повороту;
ТПП	– точка початку повороту;
УВ	– управляючі впливи;
ФК	– фільтр Калмана;
ЦВ	– центр ваги;
ШІ	– штучний інтелект;
ШНМ	– штучна нейронна мережа (Artificial Neural Networks).

ВСТУП

Актуальність дослідження. Значний ступінь аварійності світового флоту визначає необхідність вирішення проблем безпеки мореплавання. Найбільш поширеною причиною аварійності (до 80% випадків) є проблема «людського фактору» [59]. Для удосконалення процесів забезпечення безпеки плавання розробляються системи підтримки прийняття рішення (СППР) судноводіння. Вони здатні надавати судноводієві прогнозовані пропозиції з використанням знання-орієнтованих технологій, що відповідають особливостям мислення людини. Підвищення ефективності систем управління рухом судна досягається застосуванням адаптивних систем, що самоналаштовуються під змінні умови плавання, що передбачає логічне скорочення аварійних ризиків у судноводінні [59].

Маневрування суден у стиснених водах є одним з найбільш складних видів маневру, оскільки, на відміну від відкритої акваторії, на судно діє значно більша кількість факторів, що вимагає від судноводія їх врахування.

Для забезпечення безпеки руху судна ряд функцій судноводія передаються автоматичним системам судноводіння. Одним із найважливіших завдань при побудові систем автоматичного управління (САУ) судном є прогнозування руху при маневруванні та формування програмних управлінь у заданий проміжок часу [19, 20, 57, 58].

Для цього застосовуються методи та алгоритми сучасної теорії управління із застосуванням ідентифікації моделей та адаптації процесів управління суднами. При адаптивному підході модель об'єкта та процесів управління в тій чи іншій формі однозначно формується за наслідками реального руху. Проведення активного експерименту для побудови моделі об'єкта, як правило, є складним з точки зору безпеки та високих матеріальних витрат. Тому це виключає можливість застосування багатьох відомих методів ідентифікації об'єктів. Побудова СППР у судноводінні на основі методів моделювання, ідентифікації моделей та адаптації управління дозволяє мінімізувати втручання дослідника в роботу системи управління і визначає

актуальність дисертаційної роботи.

Отже, очевидно, об'єктивно існують невідповідності:

по-перше між складністю процесів маневрування у стиснених водах, пов'язаних зі збільшення інтенсивності судноплавства, з одного боку, та відсутністю достатньо ефективних методів врахування факторів, які впливають на рух суден, з іншого;

по-друге між стрімким розвитком знання-орієнтованих технологій та технологій штучного інтелекту (ШІ), удосконаленням апаратних засобів, з одного боку, та відсутністю методів підтримки маневрування судна у стиснених водах, з іншого.

Дані невідповідності вимагають вирішення **актуального наукового завдання**, яке полягає у розробці ефективних знання-орієнтованих методів підтримки маневрування суден у стиснених водах.

Дослідження проблеми маневрування суден у стиснених водах із застосуванням знання-орієнтованих методів проводили українські і закордонні вчені, зокрема: Вагущенко Л.Л., Цимбал М.М., Вагущенко А.Л., Richter R., Burns R. Значний внесок у вдосконалення методів маневрування зроблено в роботах Купмана Б.О., Фоссен Т. Томера М., Ліу Ю., Гао Х. та ін. Питаннями розробки систем підтримки прийняття рішень для маневрування суднами у стиснених водах наполегливо займаються колективи зарубіжних вчених під керівництвом Стоуна Л.Д. і Фроста Дж.Р.

У наведених роботах досліджуються процеси управління маневрування у стиснених водах, у тому числі із застосуванням інтелектуальних підходів. Проте, у повному обсязі надійні методи підтримки маневрування судна у стиснених водах в науковій літературі не висвітлені, що й обумовлює актуальність дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проведені дисертаційні дослідження є логічним продовженням низки теоретичних та прикладних досліджень з питань управління рухом засобів водного транспорту, відповідно до відповідно до Тематичного плану наукових досліджень та розробок Державного університету інфраструктури

та технологій.

Обраний напрямок досліджень тісно пов'язаний з Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №430-р від 30 травня 2018 року) [68] і Морською доктриною України на період до 2035 року (Постанова №1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, №1108) [69]. Дослідження виконано у рамках планових науково-дослідних робіт (НДР) Державного університету інфраструктури і технологій [70], [71].

Мета і завдання дослідження. *Метою* роботи є підвищення обґрунтованості та оперативності прийняття рішення судноводієм на маневрування у стиснених водах за рахунок впровадження знання-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень.

Поставлена мета досягається вирішенням таких часткових завдань:

- аналіз методів управління режимами руху судна при маневруванні;
- аналіз знання-орієнтованих моделей та методів систем підтримки прийняття рішення судноводіння;
- розроблення моделі маневреності судна у стиснених водах та на мілководді;
- ідентифікація моделі та розробка методу адаптивного управління маневруванням судна у стиснених водах;
- оцінка ефективності розроблених методів та розробка рекомендацій щодо їх впровадження.

Об'єктом дослідження є процес маневрування суден у стиснених водах.

Предметом дослідження є знання-орієнтовані моделі і методи підтримки маневрування суден у стиснених водах у складі систем підтримки прийняття рішення судноводінням.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано такі методи дослідження:

методи системного аналізу – для аналізу предметної області та обґрунтування методів управління рухом суден при маневруванні у

стиснених водах [60];

методи побудови моделей штучного інтелекту – для розроблення апаратно-програмного комплексу ідентифікації надводної обстановки [61, 62];

теорія побудови систем підтримки прийняття рішення – для побудови системи підтримки прийняття рішень забезпечення безпеки судноводіння у стиснених водах [63, 64];

методи математичного моделювання – для визначення траєкторій руху суден у стиснених водах [65, 66];

методи теорії ймовірності – для проведення моделювання й оцінювання його результатів під час апробування роботи системи підтримки прийняття рішення судноводіння [67].

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. *Удосконалено* модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

2. *Отримала подальший розвиток* модель розходження суден у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є елементом системи підтримки прийняття рішень судноводіння та дозволяє підвищити безпеку судноводіння.

3. *Удосконалено адаптивний метод* управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від відомих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується грамотною постановкою наукового завдання дослідження, комплексним використанням відомих, перевірених практикою

теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, математичного моделювання, теорії ймовірності, побудови моделей штучного інтелекту, теорії побудови систем підтримки прийняття рішення на етапах моделювання й аналізу результатів досліджень, збігом отриманих результатів з відомими експериментальними даними у даній предметній області, відкритим обговоренням результатів на наукових семінарах і конференціях і їх публікацією у рекомендованих наукових виданнях, впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність ТОВ НТЦ «Флагман».

Емпіричною базою дослідження є результати натурних досліджень поведінки суден у стиснених басейнах, результати математичного моделювання, експертні оцінки складності навігаційних ситуацій та впливу факторів мілководдя й стиснених вод.

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ судноводіння у стиснених водах шляхом розробки систем підтримки прийняття рішення судноводіння.

Практична значимість результатів дослідження полягає у подальшому вдосконаленні знання-орієнтованих моделей і методів системи підтримки прийняття рішення судноводіння, що дозволяють підвищити ефективність та безпеку маневрування у стиснених водах.

Використання наукових та прикладних результатів досліджень. Запропоновані теоретичні методи мають високий ступінь готовності до використання і доведені до їх практичної реалізації. Застосування розроблених методів дозволяє підвищити своєчасність (оперативність) вироблення рішень порівняно з неавтоматизованим способом на 19–26%. Збільшення кількості чинників, урахованих й оброблених за допомогою запропонованих методів у порівнянні з відомими, дозволяють за наявний час збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 23%. Коректний опис предметної області великою кількістю значущих чинників водночас дозволив підвищити обґрунтованість отриманих рішень.

Отримані в дисертації результати доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень судноводіння й елементів спеціального математичного та програмного у частині маневрування у стиснених водах та на мілководді; у науково-дослідних організаціях – для дослідження процесів безпеки судноводіння у стиснених водах; у закладах вищої освіти – з метою вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Основні положення дисертаційної роботи реалізовані:

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах використовуються в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій, факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» (акт № 07/01-11 від 07.01.2025 року) (Додаток В);

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння. (акт ТОВ НТЦ Флагман від 19.12.2024 року) (Додаток В).

Особистий внесок автора. Отримані наукові результати сформульовані та отримані автором самостійно. Окремі етапи досліджень було проведено у співавторстві, їх результати відображені у відповідних публікаціях:

у роботі [75] автором проведено дослідження знання-орієнтованих моделей та методів, які можуть бути застосовані у системах підтримки прийняття рішення судноводіння та обґрунтовано застосування апарату штучних нейронних мереж;

у статті [77] досліджено моделі та методи розрахунку гідродинаміки судна на хвилюванні, які враховують особливості цього процесу генерацію

внутрішніх хвиль в розділі поверхні вода-мул;

у роботі [78] отримала подальший розвиток модель розходження суден у стиснених водах, яка враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є підсистемою системи підтримки прийняття рішень судноводіння;

у роботі [79] удосконалений адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, що ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом.

Публікації. Відповідно до теми дисертаційної роботи опубліковано: 5 наукових статей в українських виданнях, які входять до затвердженого МОН України переліку наукових фахових видань та 3 публікації матеріалів доповідей, які додатково відображають результати роботи.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-практичних конференціях, у тому числі [72, 73].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації містить 170 сторінок друкованого комп'ютерного тексту. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 152 сторінках. Робота містить 23 таблиць, 54 рисунків, список використаних джерел із 108 найменувань, що розміщено на 11 сторінках, 3 додатки на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН

В даному розділі дисертаційної роботи проводиться аналіз існуючих моделей управління режимами руху суден при маневруванні. Описуються види маневрів, будуються відповідні моделі. Проводиться аналіз знання-орієнтованих систем, які можуть бути використані при побудові інтелектуальних систем підтримки маневрування суден. Виділяється клас штучних нейронних мереж як знання-орієнтованих систем, спрямованих на підтримку прийняття рішення судноводієм на маневрування у стиснутих водах. Основними результатами, отриманими у розділі є перелік факторів, які впливають на маневрування, обґрунтування вибору знання-орієнтованих систем та постановка наукового завдання.

1.1 Аналіз методів управління режимами руху судна при маневруванні

Сучасне судноплавство представляє собою сукупність значної кількості об'єктів найскладнішої технічної та організаційно-правової системи [11]. З іншого боку, судно, як рухомий об'єкт, є також складною керованою системою, що містить значний комплекс інших керованих систем у взаємозв'язку з навігаційною обстановкою (НО).

Маневрування судна у взаємозв'язку з НО та його маневреними якостями є одним із найважливіших завдань забезпечення безпеки мореплавання [12].

Стандарти ІМО виділяють найбільш суттєві фактори, які відносяться до характеристик судна для оцінки його маневрених якостей [13]:

- власна динамічна стійкість;
- стійкість на курсі;
- початкова поворотність;

- пискливість;
- гальмівні характеристики.

У судноводінні під маневреними якостями розуміється, як правило, їх узагальнені поняття: керованість та маневреність. На основі аналізу цих понять з різних джерел у роботі [14] з позицій гідромеханіки сформульовані такі визначення.

Керованість судна – здатність системи відповідати певним змінам вихідних параметрів на певний управляючий вплив.

Маневреність судна – здатність системи змінювати напрям руху з деякою досяжною швидкістю.

З цих понять складається практичний додаток визначення маневрування судна – зміна напрямку руху судна та його швидкості під дією управляючих пристроїв (гвинта, керма) з метою забезпечення безпеки плавання та вирішення експлуатаційних завдань.

Під терміном маневр розуміється заздалегідь визначена зміна будь-яких елементів, параметрів руху судна. Маневрування судна визначає можливість забезпечення належної швидкоплинності цього процесу, відповідно, втрата маневреності судна призводить до втрати керованості, оскільки без швидкості рух судна стає практично некерованим.

На підставі цього та характеру зміни параметрів руху судна, виконувані маневри для подальшого аналізу та дослідження можна класифікувати за такими періодами (рис. 1.1).

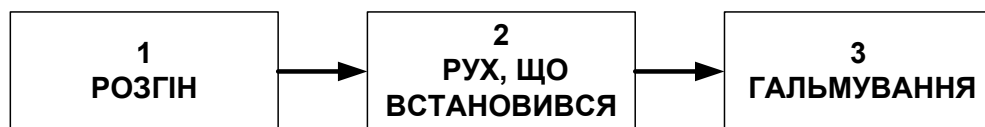


Рисунок 1.1 – Періоди руху судна
(Джерело – розроблено автором)

Відповідно до досліджень методів маневрування [15, 16], за кількістю суден розрізняються такі види:

- маневрування одного судна щодо нерухомого об'єкта, або одностороннє маневрування;
- маневрування одного судна щодо об'єкта, який рухається, або двостороннє маневрування;
- маневрування, в якому беруть участь більше двох суден, багатостороннє маневрування.

Залежно від того, як задається при маневруванні напрямок руху судна, розрізняють такі способи маневрування:

- прямолінійне маневрування, коли судно утримується на постійному курсі;
- маневрування на постійній дальності, коли траєкторія руху судна відповідає умові сталості дистанції до об'єкта маневру;
- маневрування на постійних курсових кутах, коли траєкторія руху судна відповідає умові сталості курсового кута на об'єкт маневру;
- змішане маневрування, коли одне судно маневрує на постійному курсовому куті, а інше судно на прямому курсі.

Критерії маневреності та керованості пов'язані між собою параметрами руху судна. Дані величини знаходяться в суворій ієрархії між собою. Для визначення цих зв'язків для завдань маневрування та управління судном необхідно уточнити параметри руху судна та визначити їх ієрархічні залежності у процесі виконання маневру.

Мета управління рухом судна полягає у підтримці або зміні елементів, що визначають рух судна для вирішення конкретних завдань плавання. Такі елементи називаються параметрами руху судна, а елементи, утримання чи зміна яких є метою управління судна, – керованими параметрами. Дані елементи добре відомі й розглядаються з різних позицій у теорії управління судна [17]. У практичному судноводінні це – мінімум: курс, швидкість, положення керма, відповідна йому частота обертання гвинта.

Перед початком виконання будь-якого маневру судноводій здійснює вибір засобів управління судном (кермо, частота обертання гвинта,

підрулюючий пристрій), а також ступінь їх впливу на судно при обраному режимі руху. На підставі цього вибору він здійснює прогнозування переміщення судна в реальних умовах плавання (вітер, хвилювання моря, течія) та НО. Інформаційною основою для виконання такого прогнозу для судноводія є дані, які характеризують поточний стан зовнішнього середовища та фактичні параметри руху судна:

- глибина місця виконання маневру;
- параметри хвилювання;
- параметри, що характеризують стан завантаження судна (осадка);
- швидкість та напрям вітру;
- швидкість та напрямок течії;
- технічні характеристики та стан засобів управління судном;
- показники керованості та маневреності судна.

Цей прогноз спирається на практичний досвід судноводія і часто виявляється суб'єктивним. У більшості випадків судноводій послідовно, методом спроб і помилок, оцінює правильність вироблених ним дій. Швидкоплинність виконання багатьох маневрів з часом не дає судноводію право на таку помилку, яка може привести як мінімум до втрати чималого часу на її усунення. Покладаючись при управлінні судном тільки на свою інтуїцію та практичний досвід, судноводій багаторазово підвищує ризики виникнення можливих аварійних ситуацій, що вимагає створення відповідних систем підтримки прийняття рішення (СППР).

Реалізація маневру (як у ручному, так і в автоматичному режимі) з метою зміни напрямку руху судна безпечною траєкторією проводиться шляхом перекладок керма й полягає в його переміщенні з однієї лінії прямого шляху на іншу або виконання спеціальних маневрів [11]. Закінченням маневру є суміщення при нульовій кутовій швидкості, діаметральної площини судна із заданою лінією шляху, тобто вирішення завдання суміщення «лінія»-«лінія», відповідно до класифікації [15].

При ручному управлінні маневрами судна у судноводінні традиційно існує значна кількість способів графічного та аналітичного урахування циркуляції судна на поворотах [16]. У більшості випадків, всі способи полягають у визначенні точок початку повороту (ТПП) й точок закінчення повороту (ТЗП) та подання траєкторії циркуляції судна деякою лінією.

Визначення судноводієм ТПП та ТЗП при ручному управлінні маневром судна залежить від достовірності інформації щодо його маневрених якостей. Організація визначення маневрених елементів, види маневрів та режими руху регламентуються стандартами ІМО [18] з відповідним стандартним відображенням маневреної інформації на судах:

- лоцманська картка;
- таблиця маневрених характеристик;
- формуляр маневрених характеристик.

Графічні дані, отримані експериментально, побічно враховують динамічні якості судна та представляють простоту й наочність планування маневрів судна. Формуляр маневрених характеристик є повнішим документом, що містить докладну інформацію про маневрені характеристики судна та впливи на нього різних факторів, крім інформації, наведеної у таблицях маневрених елементів. Є також різні табличні способи урахування маневрених елементів судна, які можуть бути включені в формуляр маневрених характеристик як додаткові дані.

Для визначення ТПП, координати якої враховуватимуть характеристики поворотливості, застосовуються різні методи контролю розташування, як правило, з використанням ізоліній навігаційних параметрів [19, 20].

Для закінчення маневру приходу до ТЗП такої визначеності немає. При цьому визначення показників повороту судна судноводій, як правило, здійснює відповідно до свого досвіду та кваліфікації, але орієнтуючись на НО та рух судна (кутову швидкість, полюс повороту, ширину смуги, яку займає судно, та її розташування щодо судноплавної частини).

Тому визначення моменту закінчення повороту, знаходження точки

отримання повороту (ТОП) та точності приходу судна в ТЗП із заданим курсом (положенням діаметральної площини судна) має важливе значення для вирішення багатьох завдань маневрування та забезпечення безпеки мореплавства.

У дослідженні [21] детально доведено, що використання радіолокаційних станцій (РЛС) та різних ліній положення для контролю приходу в ТПП не завжди забезпечує вихід судна на задану лінію шляху (ЛШ), а, відповідно, рух судна за знятою з графіка кривою циркуляції може значно відрізнитися від запланованої траєкторії повороту (рис. 1.2).

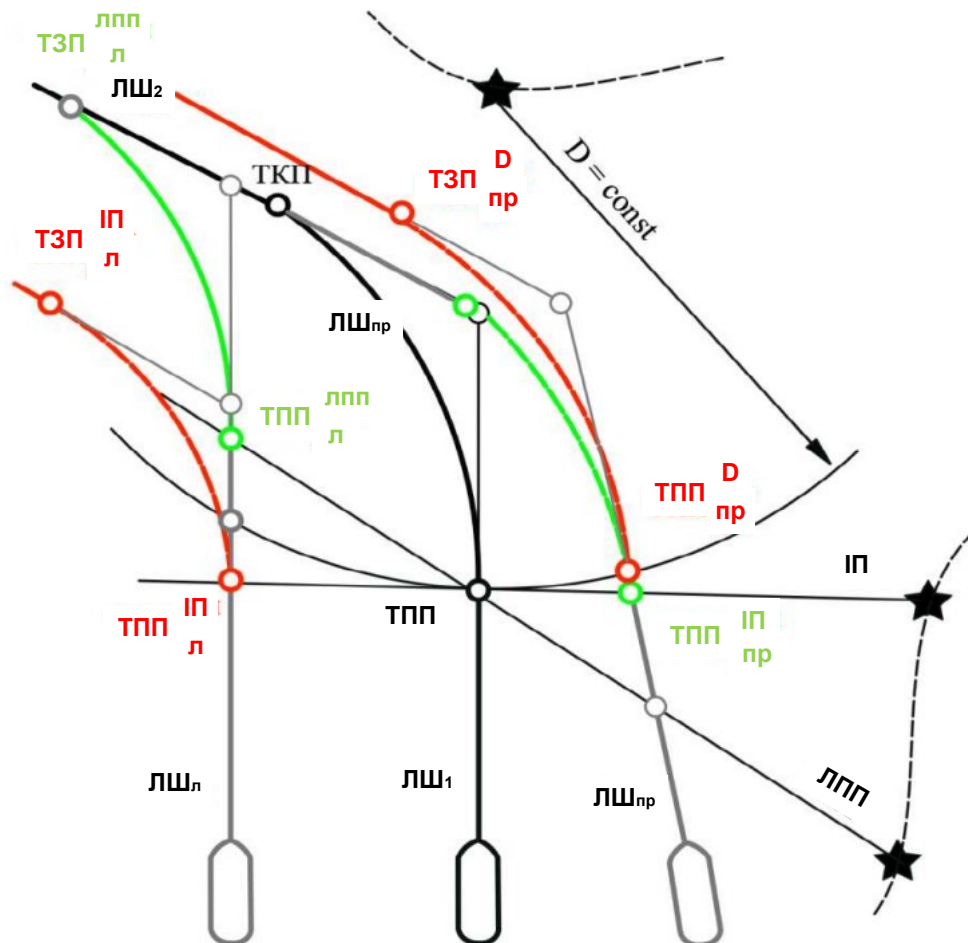


Рисунок 1.2 – Контроль повороту судна лініями положення різних навігаційних параметрів

(розроблено автором за результатами аналізу [15, 18, 21])

На рис. 1.2 позначено: ЛШ – задана лінія шляху; ЛПП, D, ПП – верхні

символи параметрів, відповідні методи контролю: лінія початку повороту, дистанція, істинний пеленг; 1,2 – нижні символи прямолінійних відрізків шляху; л, пр – нижні символи при відхиленнях ліворуч та праворуч, відповідно; ЛПП – лінія початку повороту.

Проведений аналіз роботи [16] та практика управління свідчать, що рух судна на повороті під час управління його курсом виражається збільшенням або зменшенням значень кутової швидкості повороту в залежності від кута перекладки керма та тривалості маневру.

Відповідні до викладених принципів керуючі впливи пропонується формувати за попередньо складеними таблицями та графіками циркуляції судна й подавати такими узагальненими функціями часу: кута перекладки керма, величини зміни курсу та кутової швидкості, висування, зміщення та стану судна.

$$f(t, \delta, T) \equiv [\psi], \quad \dot{f}(t, \delta, T) \equiv [\omega], \quad (1.1)$$

$$f(t, \delta, T) \equiv [S], \quad \dot{f}(t, \delta, T) \equiv [l], \quad (1.2)$$

де $f(\dots)$ – функція зміни параметрів руху й траєкторії судна при перекладці керма; t – тривалість маневру; $[\psi]$, $[\omega]$ – таблиці, які відображають зміну курсу та кутової швидкості судна; $[S]$, $[l]$ – таблиці, які відображають значення висування та зміщення; δ – кут перекладки керма, град., T – осадка судна, м.

Аналіз вищенаведених документів та способів маневрування свідчить, що вони повною мірою не відображають особливості маневрування суден й потребують доповнення та уточнення, а саме:

1) жоден зі зазначених способів та методів урахування циркуляції судна не показує способи знаходження ТОП, що може призвести до значних помилок при виході судна на новий заданий курс та шлях;

2) табличні способи урахування циркуляції, незважаючи на свою простоту, також не позбавлені деяких недоліків, пов'язаних з тим, що

розрахункова та дійсна крива циркуляції, як правило, не збігаються між собою (рис. 1.3). Величина цієї помилки залежить від різних факторів, таких як розмір судна та наявність мертвого проміжку тощо.

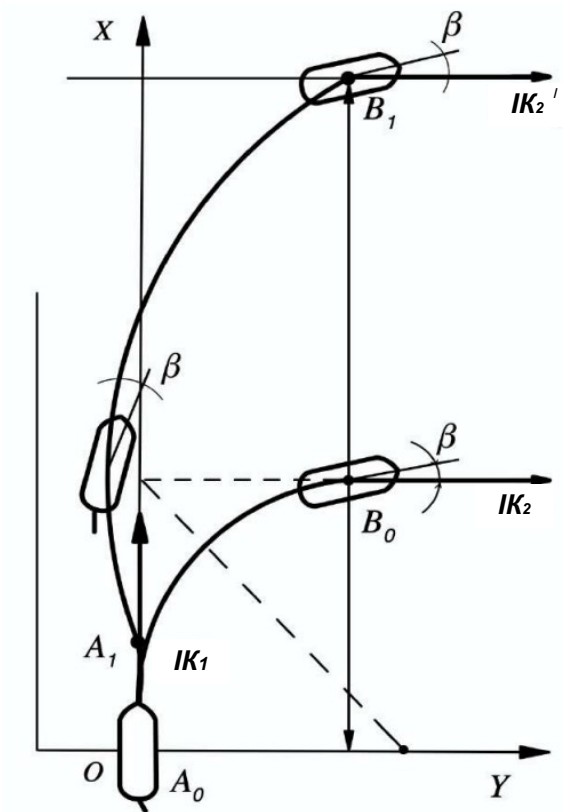


Рисунок 1.3 – Розрахункова та дійсна криві циркуляції при маневруванні судна
(джерело: [22])

На рис. 1.3 позначено: β – кут дрейфу; A_0 – ТПП; A_1 – точка початку маневреного періоду циркуляції; B_0 , B_1 – розрахункова та дійсна ТЗП; IK_1 , IK_2 – істинний курс початку та закінчення циркуляції; OXY – рухома пов'язана з судном система координат.

При керуванні судном за допомогою систем автоматичного управління (САУ) управління здійснюється способом завдання програмних траєкторій. За сучасними вимогами ІМО (SOLAS-74, Пр. V/34, Резолюція А.893(21)) також потрібно завчасне планування рейсу, шляху руху судна та його параметрів. Програмною траєкторією руху судна називається бажаний закон

зміни у часі послідовних місць центру ваги (ЦВ) та напрямків діаметральної площини судна, заданий у будь-якій системі координат [22].

Аналітично крива циркуляції судна характеризується масивом точок, причому кожній точці відповідає момент часу, кутова швидкість повороту, курс судна та координати. Аналогічні характеристики має траєкторія отримання повороту.

Основним елементом САУ судна є авторульовий. Класичним призначенням авторульового в завданні управління рухом судна при використанні керма як єдиного керуючого пристрою, є стабілізація судна на заданому курсі. Зазначене завдання вирішується шляхом вироблення тим чи іншим способом поправки до заданого курсу для утримання судна на заданій траєкторії чи повороту на нову задану траєкторію.

Така поправка, як правило, дорівнює курсовому куту ділянки траєкторії, а стабілізація на цьому відкоригованому курсі здійснюється з використанням ПІД-регулятора, який, у свою чергу, реалізує зворотний зв'язок щодо відхилення курсу від відкоригованого, інтегралу від цього відхилення та похідної від нього [23].

Способи здійснення повороту судна є важливою складовою авторульової системи. Як правило, використовуються два способи налаштувань зміни курсу судна:

- швидкість зміни курсу – найчастіше використовуваний метод повороту судна, що налаштовується в межах від 1-300 градусів за хвилину;
- налаштування межі перекладки керма від 1° до максимального можливого.

Сучасні авторульові системи суден дозволяють змінювати курс з огляду на радіус їхнього повороту. Визначення моменту ТОП при виході з циркуляції з використанням авторульової системи здійснюється вахтовим також на підставі свого досвіду з урахуванням маневрених характеристик судна при використанні будь-якого методу.

У сучасних системах навігації та САУ найпопулярнішим видом

інформаційних даних про процеси руху судна є часові ряди вимірюваних з різною дискретністю параметрів (широта, довгота, курс, швидкість, кутова швидкість, положення пера керма, обороти рушія тощо) [20].

Таким чином, для побудови знання-орієнтованих систем, що забезпечують високоточні повороти судна при маневруванні необхідно вирішення наступних завдань:

- здійснити експериментальне дослідження еволюції щодо один одного кінематичних параметрів руху судна на повороті;
- визначити залежності між вхідними та вихідними спостерігаємими параметрами руху судна;
- здійснити ідентифікацію та побудову моделі управління судном на циркуляції;
- здійснити адаптацію ідентифікованої математичної моделі до змінних умов плавання.

Засоби управління, встановлені на судна, можуть бути розділені на дві групи: головні (ГЗУ) та допоміжні засоби управління (ДЗУ).

До ГЗУ судном відносяться засоби управлінням кермом, засоби управління двигуном та засоби активного управління. Слід зазначити, що гвинт також може бути використано під час маневрування на тісних акваторіях та під час швартових операцій, наприклад, для виконання обертання судна, але такі маневри недовговічні та займають невелику частку в експлуатаційному періоду вантажних суден. Відносно невелика кількість вантажних суден обладнанні засобами активного управління, які здатні створювати бічну силу при відсутності руху судна. До них відносяться: окремі поворотні насадки, поворотні гвинтові колонки, крилаті двигуни, активні рулі. Значна кількість вантажних суден, які забезпечені підрулюючими засобами, є ефективними тільки на невеликих швидкостях.

З позиції управління судном, інтерес представляють ГЗУ: гвинти, які можуть бути фіксованого або регульованого кроку, та керма, що представляють собою крило в кормовій частині судна. На відхилення від

діаметральної площини керма при русі в потоці води виникає поперечна сила, що викликає розворот судна. Ця сила пропорційна квадрату швидкості потоку води, оточуючої перо керма. Відзначимо, що даний потік може бути створений як роботою гвинта, так і рухом судна при зупинці двигуна.

На керованість судна впливає значна кількість факторів (рис. 1.4).

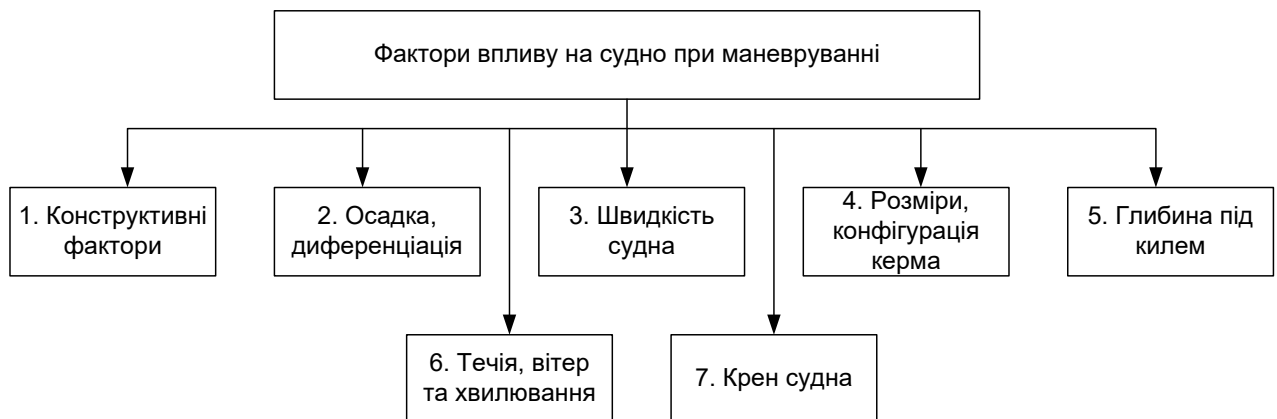


Рисунок 1.4 – Основні фактори впливу на судно при маневруванні
(Джерело – розроблено автором)

Конструктивні фактори: параметри корпусу судна та форма його корпусу – зазвичай, розраховуються при проектуванні судна, вони документуються після будівництва та відомі в процесі експлуатації при відсутності істотних змін в конструкції судна.

Осадка, диференціація – визначається завантаженням та баластуванням судна в залежності від вантажу.

Швидкість судна – безпосередньо залежить від потужності основних двигунів та рекомендацій щодо безпечної швидкості у відповідності до існуючої навігаційної обстановки.

Розміри, конфігурація та розміщення керма як ГЗУ – розраховуються на стадії проектування та є постійними і в процесі експлуатації.

Глибина під кілем змінюється на протязі переходу судна, впливає на його маневрені характеристики та посадку, враховується при плануванні рейсу.

Течія, вітер та хвилювання поверхні води – зовнішні фактори

середовища експлуатації судна, що призводять до додаткової сили на корпусі, з якими повинен рахуватися судноводій та, за певних обставин, дію яких він компенсує за допомогою ГЗУ.

Крен судна – може бути викликаний як завантаженням судна, так і дією рухомих, зовнішніх та реактивних сил та моментів. Якщо судно має статичний кут крену, то збільшення діаметру циркуляції в сторону крену та зменшення в протилежну сторону обумовлено надмірним тиском води на вилицю зі сторони накреного борту. Крен розглядається як небажаний супутній маневруванню фактор, для його зменшення використовують виличні кілі, бортові керма, пасивні та активні цистерни.

В роботі [24] наведена повністю параметризована модель для опису руху контейнеровозу в чотирьох ступенях свободи, отримана на унікальній установці RPMM – roll planar motion mechanism) в Данському морському інституті (Danish Maritime Institute).

Ця установка дозволяє проводити дослідження моделі з повною динамічною взаємодією між качкою, ристанням та рухом відносно поперечної вісі. Модель заснована на експериментальних результатах з установки RPMM і загальних повномасштабних натурних дослідженнях на судні. Коефіцієнти гідродинамічних характеристик (ГДХ) (табл. 1.1) для моделі контейнеровозів визначені експериментально.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти ГДХ для RPMM моделі контейнеровозу
(Джерело – розроблено автором)

$C_Y^v = -0,0116;$	$C_Y^\omega = 0,00242;$	$C_Y^p = 0;$
$C_Y^\theta = -0,000063;$	$C_Y^{vvv} = -0,109;$	$C_Y^{\omega\omega\omega} = 0,00177;$
$C_Y^{v\omega\omega} = 0,0214;$	$C_Y^{v\omega\theta} = -0,0405;$	$C_Y^{v\theta\theta} = 0,04605;$
$C_Y^{v\theta\theta} = 0,00304;$	$C_Y^{\omega\omega\theta} = 0,009325;$	$C_Y^{\omega\theta\theta} = -0,001368;$
$C_M^v = -0,0038545;$	$C_M^\omega = -0,00222;$	$C_M^p = 0,000213;$
$C_M^\theta = -0,0001424;$	$C_M^{vvv} = 0,001492;$	$C_M^{\omega\omega\omega} = -0,00229;$
$C_M^{v\omega\omega} = -0,0424;$	$C_M^{v\omega\theta} = 0,00156;$	$C_M^{v\theta\theta} = -0,019058;$
$C_M^{v\theta\theta} = -0,0053766;$	$C_M^{\omega\omega\theta} = -0,0038592;$	$C_M^{\omega\theta\theta} = 0,0024195;$

У середовищі Matlab з використанням Marine GNC toolbox [25] було проведено моделювання руху на циркуляції RPMМ моделі контейнеровозу з перекладкою керма 35° в момент часу t , що дорівнює 100 с. Побудовані залежності кінематичних параметрів: кут крену (roll angle), кут дрейфу (drift angle), швидкості центру ваги судна (speed) повздовжньої (surge speed) та поперечної (sway speed) складових від часу, як наведено на рисунку 1.5.

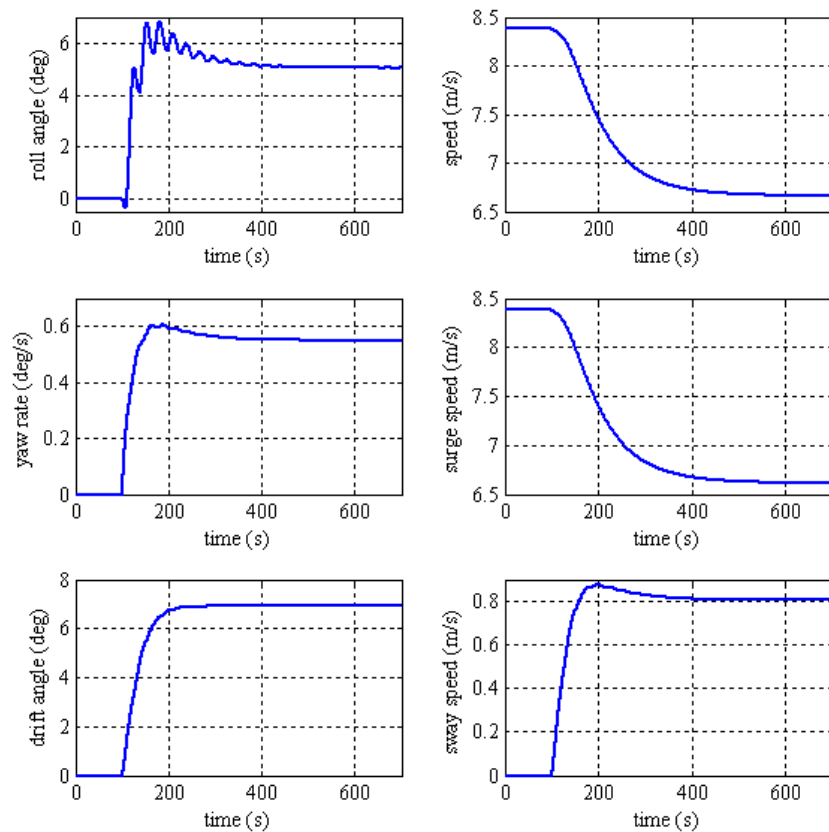


Рисунок 1.5 – Залежності кінематичних параметрів моделі контейнеровоза від часу на циркуляції при перекладці керма у 35° (побудовано за результатами моделювання в системі MathLab автором. Скріншот з екрану)

Були розраховані коефіцієнти $C_{Y\Gamma}$ та $C_{M\Gamma}$ та побудовані графіки цих функцій часу, які наведені на рис. 1.6 та 1.7. У однакових осях в залежності від часу були побудовані значення кожного доданка для оцінювання компонентів в результуюче значення сили та моменту.

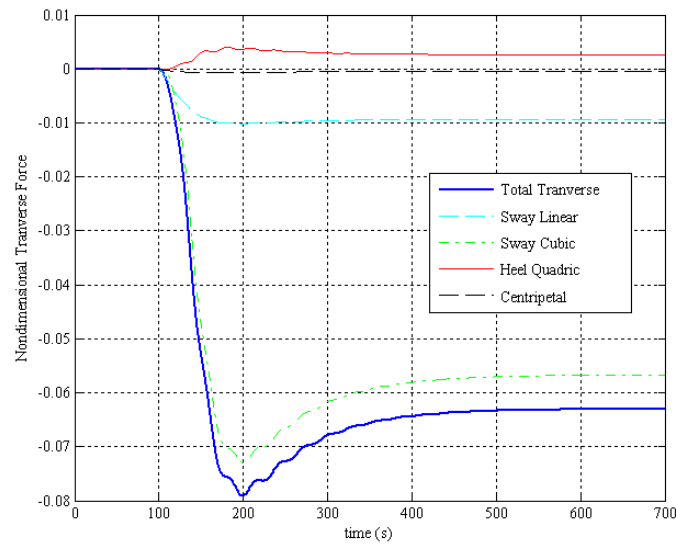


Рисунок 1.6 – Графік залежності від часу безрозмірної поперечної гідродинамічної (ГД) сили та її компонент (побудовано за результатами моделювання в системі MathLab автором. Скріншот з екрану)

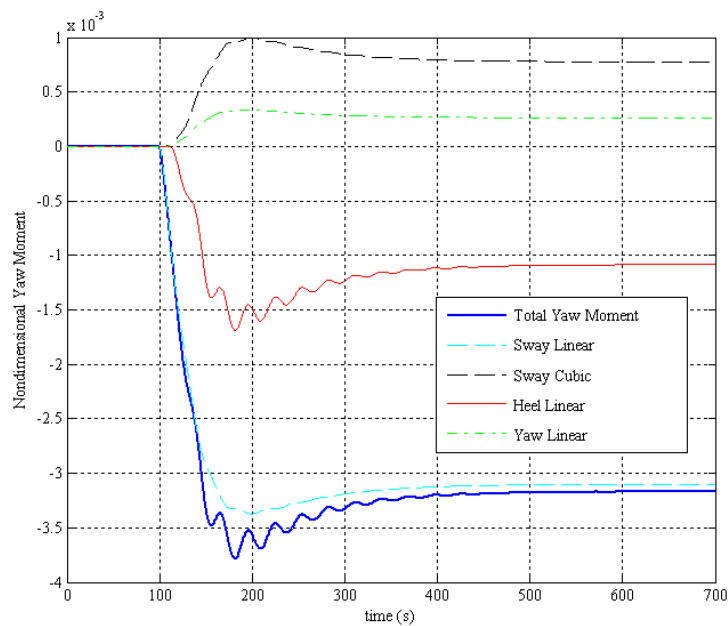


Рисунок 1.7 – Графік залежності від часу безрозмірного ГД моменту та його компонент (побудовано за результатами моделювання в системі MathLab автором. Скріншот з екрану)

З даних, наведених на рис. 1.6, витікає, що на ГД силу значний вплив мають лише три складові з коефіцієнтами, які залежать від v , v^3 та $v^2\theta$ з

табл. 1.1. Вплив решти компонент при русі судна на циркуляції значно менший та ними можна нехтувати. Таким чином, рівняння для визначення безрозмірної поперечної ГД сили запишемо так:

$$C_{Y\Gamma} = C_Y^{\nu} \nu + C_Y^{\nu\nu\nu} \nu^3 + C_Y^{\nu\nu\theta} \nu^2 \theta. \quad (1.3)$$

З даних, наведених на рис. 1.7, видно, що на безрозмірний ГД момент значно впливають коефіцієнти, залежні від ν , ν^3 , $\nu^2\omega$ та $\nu^2\theta$ з табл. 1.1. Впливом інших компонент при русі судна на циркуляції нехтуємо, виходячи з їх відносної малості. Рівняння для визначення безрозмірної ГД моменту приймає вигляд:

$$C_{M\Gamma} = C_M^{\nu} \nu + C_M^{\nu\nu\nu} \nu^3 + C_M^{\nu\nu\omega} \nu^2 \omega + C_M^{\nu\nu\theta} \nu^2 \theta. \quad (1.4)$$

Падіння швидкості судна на циркуляції розраховується окремо від інших кінематичних параметрів, оскільки значення ν , ω та θ змінюються набагато швидше. Тому в околиці значень ν , ω та θ можна вважати швидкість судна V постійною: $V_Y = \nu = V \cdot \sin \beta \cong V \cdot \beta$;

Тоді рівняння (1.3) та (1.4) можна представити у вигляді такої системи:

$$\begin{cases} C_{Y\Gamma} = C_Y^{\beta} \beta + C_Y^{\beta\beta\beta} \beta^3 + C_Y^{\beta\beta\theta} \beta^2 \theta; \\ C_{M\Gamma} = C_M^{\beta} \nu + C_M^{\beta\beta\beta} \beta^3 + C_M^{\beta\beta\omega} \beta^2 \omega + C_M^{\nu\nu\theta} \nu^2 \theta. \end{cases} \quad (1.5)$$

Аналізуючи систему (1.5), можливо зробити такі висновки:

1) При моделюванні на RPMM поперечної ГД сили вплив ω не враховується, тобто $C_Y^{\omega} = C_Y^{\beta\omega\omega} = 0$;

2) При моделюванні на RPMM ГД моменту $C_M^{\omega} = C_M^{\omega\omega\omega} = 0$.

Залежності (1.5) можуть бути доведені до вигляду математичних моделей щодо β та ω , використовуючи метод точної апроксимації. Можна

використовувати принцип суперпозиції для ГД компонента крену, оскільки інші параметри для конкретного типу судна можна розрахувати за відомими методами, не вдаючись до дорогого та енергоємного експерименту на РРММ. Урахування впливу крену на процес маневрування пропонується здійснювати шляхом розкладання сили та моменту гідродинамічної реакції рідини на позиційну, обертальну та кренові компоненти:

$$C_{YГ}, C_{MГ} = f(\beta) + f(\omega) + f(\theta). \quad (1.6)$$

Креновою складовою сили F^h будемо вважати неінерційну гідродинамічну силу в'язкісної природи, що діє на корпус в горизонтальній площині при русі судна з кутом крену θ , та силу, що викликає оберти судна в бік, протилежний крену (див. рис. 1.7). Відповідна назва горизонтального моменту від крену судна має момент, який створений цією силою.

1.2 Аналіз методів планування траєкторії та рухів суден

Планування траєкторії зводиться до її завдання й побудови в просторі за відомими координатами двох точок (А, В) (рис. 1.8). Якщо рухомий об'єкт (судно) є локально управляємим, то можна з будь-якої точки А простору у початковий момент часу перевести його в будь-яку іншу – кінцеву точку В за час t_k . Для цього необхідно знайти відповідну керуючу функцію та вирішити класичне завдання планування, відоме як “проблема переміщення рояля”.

Однак, при такому формулюванні, не наклавши обмежень, завдання має множину рішень. Можливі переміщення рухомого об'єкта (рис. 1.8) уздовж прямої, що з'єднує початкову й кінцеву точки (прямолінійна траєкторія), або уздовж деякої гладкої кривої, задовольняючи ряд обмежень на початковій й кінцевій ділянках траєкторії (згладжена траєкторія). Отже, при плануванні траєкторій та режимів руху суден виділяють такі етапи:

- 1) формування послідовності вузлових точок у декартовому просторі, розташованих уздовж планованої траєкторії;
- 2) завдання обмежень на положення, швидкість та прискорення узагальнених координат рухомого об'єкта у вузлових точках траєкторії;
- 3) вибір з деякого класу аналітичної функції (апроксимуючої), що проходить через усі вузлові точки та задовольняє заданим обмеженням бажаної траєкторії;
- 4) завдання режимів руху рухомого об'єкта за спланованою траєкторією.

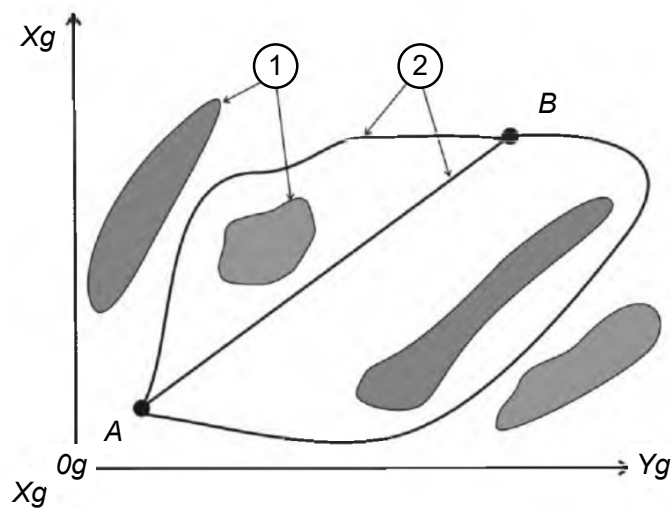


Рисунок 1.8 – Переведення рухомого об'єкта з точки у точку в просторі координат (Джерело – розроблено автором):

1 – навігаційні небезпеки; 2 – можливі траєкторії руху об'єкту

Апроксимація заданої траєкторії в кінематичних параметрах або декартових координатах виконується планувальником. У результаті отримується послідовність точок, через які повинен пройти рухомий об'єкт при русі від початкової до кінцевої точки траєкторії (рис. 1.9).

Якщо послідовність заданих точок траєкторії (векторів у просторі кінематичних параметрів) формується без урахування обмежень динаміки рухомого об'єкта, то при наступному управлінні рухомим об'єктом за спланованою траєкторією можуть виникнути значні відхилення відстеження.

Отже, плануючи траєкторію, необхідно виділити характерні шляхові точки (точки додатку силових впливів), в яких буде проводитися перемикання керуючих функцій при переході з одного прямолінійного або криволінійного відрізка траєкторії на наступний.

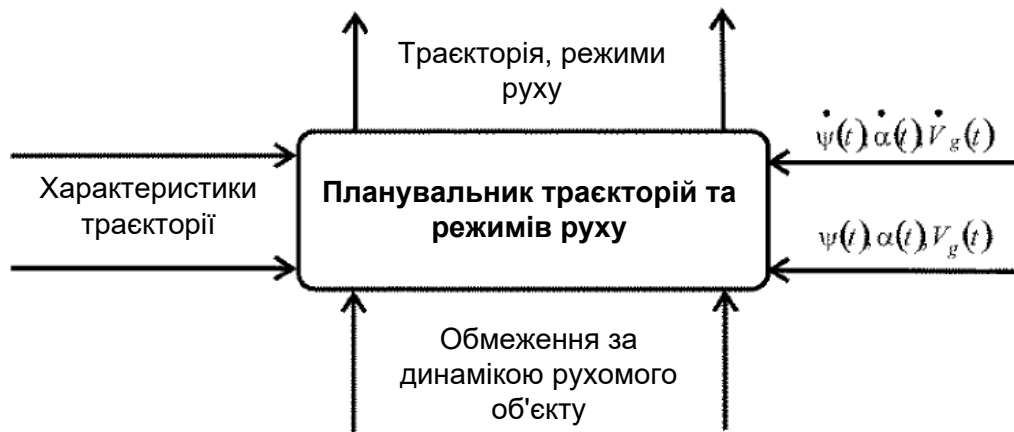


Рисунок 1.9 – Планувальник траєкторій
(Джерело – розроблено автором)

Планування траєкторії рухомого об'єкта полягає у визначенні необхідної кількості відрізків траєкторії зі значеннями похідних вектора швидкості, моментів перемикання керуючих функцій для забезпечення переходу об'єкта з даного відрізка траєкторії на наступний.

Помилки в управлінні судном – результат неправильної оцінки та урахування судноводієм діючих на судно сил та моментів, а також ступеня їх впливу на параметри руху.

Дослідження [26, 27] свідчать, що траєкторії, застосовувані для завдання руху судна, повинні задовольняти таким вимогам:

- 1) мати єдині принципи завдання й формування;
- 2) координати точок траєкторії та їх зміна повинні лежати в межах геометричних і фізичних обмежень маневрування, що враховують можливість гальмування або розгону, або зміни напрямку руху, тобто траєкторія повинна бути фізично реалізованою;
- 3) характерні точки траєкторії повинні отримуватися нерекурентним

способом з відсутністю пошуків рухів типу “блукання”. Синтез алгоритмів управління зі зворотним зв'язком може здійснюватися у відхиленнях від програмної траєкторії;

4) допустима траєкторія повинна враховувати динаміку судна й виконавчих пристроїв (гвинт, кермо), тобто мати можливість двічі диференціюватися (неможливо миттєво переключити кермо на заданий кут або набрати задану частоту обертання гвинта, кутову швидкість обертання). Якщо на малих швидкостях інерційністю органів управління зневажають, то для високих швидкостей прийнятна точність неможлива без урахуванні даної фізичної особливості;

5) необхідно враховувати обмеження на максимальну кривизну траєкторії (мінімальний радіус кривизни траєкторії), що відповідає граничним переключкам керма; максимальної потужності рушія й підрулюючого обладнання; упору, створюваному буксирами. У роботі [24] пропонується задавати судновій управляючій системі динамічні властивості у вигляді обмеження на кутову швидкість повороту, що дозволяє визначити програмний режим руху судна на ділянках маршруту з постійною кривизною (з постійним прискоренням кутової швидкості):

$$\frac{d\psi}{dt} \leq r_{max}; \quad \frac{d\psi}{dS} \leq \frac{1}{R_{min}} = k_{max} \quad (1.7)$$

де r_{max} – максимальна кутова швидкість судна; R_{min} – мінімальний радіус циркуляції; k_{max} – максимально допустиме значення кривизни;

6) при завданні траєкторії відходу від причалу або підходу судна до нього рух у загальному випадку рух повинен бути спрямований від причалу або до нього (рисунки 1.10);

7) апроксимуюча траєкторія проходить через усі вузлові точки;

8) апроксимуюча крива не вносить у маршрут додаткових точок перегину;

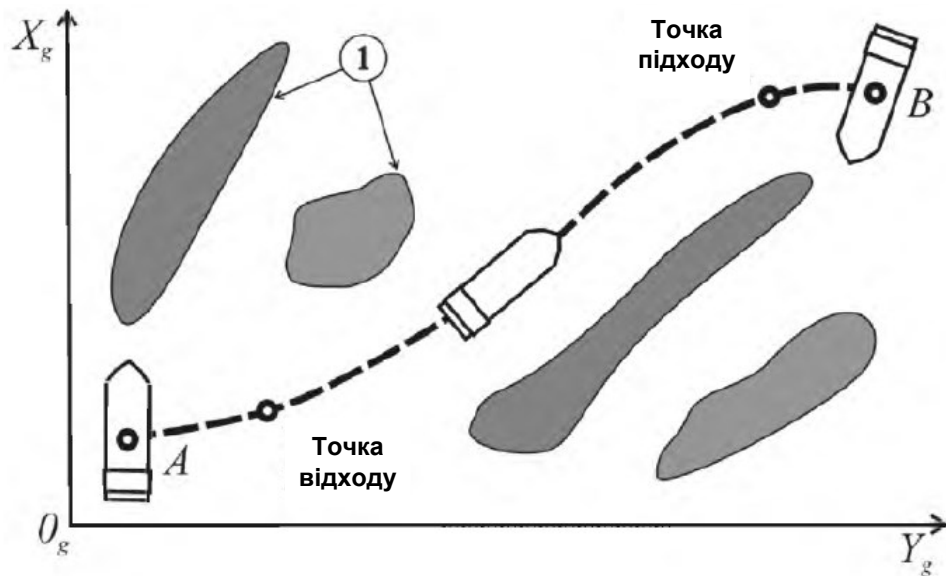


Рисунок 1.10 – Обмеження щодо положення для траєкторії в просторі
кінематичних параметрів
(Джерело – розроблено автором)

9) величина апроксимуючої функції повинна приймати нульові значення, коли точка управління рухомим об'єктом перебуває на траєкторії, і зменшується або збільшується, при наближенні/видаленні від траєкторії, оскільки при відстеженні траєкторії потрібно обчислювати відстань від точки управління рухомим об'єктом до траєкторії й похідні від цього відстані;

10) у критеріях безпеки та якості траєкторії повинні враховуватися знання, досвід, навички команди судноводія, накопичені у процесі роботи, місцеві правила, звичаї порту;

11) забезпечення безпеки плавання за поточними навігаційними умовами;

12) алгоритм системи управління повинен забезпечити переміщення об'єкта з початкової точки в задану цільову точку з виконанням таких умов:

$$D_i \geq D_{min}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1.8)$$

де n – кількість найближчих точок, що належать одній або декільком перешкодам; D_i – поточна найменша відстань від рухомого об'єкта до небезпеки; D_{min} – допустима найкоротша відстань від точки рухомого

об'єкта до небезпеки.

Для виконання цих суперечливих вимог доцільно скористатися природнім поділом рухів судна на прямолінійні й криволінійні, які використовуються у практичному судноводінні. Крім того, такий підхід також спрощує синтез алгоритмів управління судном та відстеження траєкторій за методом зворотних завдань динаміки.

1.3 Аналіз знання-орієнтованих моделей та методів систем підтримки прийняття рішення судноводіння

Знання-орієнтовані технології широко використовуються для рішення завдань ідентифікації та управління динамічними об'єктами, у т. ч. і суднами.

Машинне навчання (ML) дозволяє системам штучного інтелекту (ШІ) вчитися на основі даних. Воно ефективне для нелінійних систем і не залежить від математичної моделі системи. Огляд застосування нейронних мереж (НМ) і штучних нейронних мереж (ШНМ) у навігаційних системах сучасних суден наведено на рис. 1.11. Розглянуто апроксимацію геометричного розмивання точності (GDOP) [30, 31], обробку GPS-навігації [32, 33], визначення місцеположення з використанням НМ [30] та прогнозування диференціальних повідомлень про поправки DGPS з використанням НМ [34]. Особливість застосування знання-орієнтованих систем полягає у тому, що підходи, засновані на ШІ, можуть не вимагати чисельних методів визначення динаміки системи та спостережень, що є ключовою відмінністю між ними та іншими формами методів оцінювання.

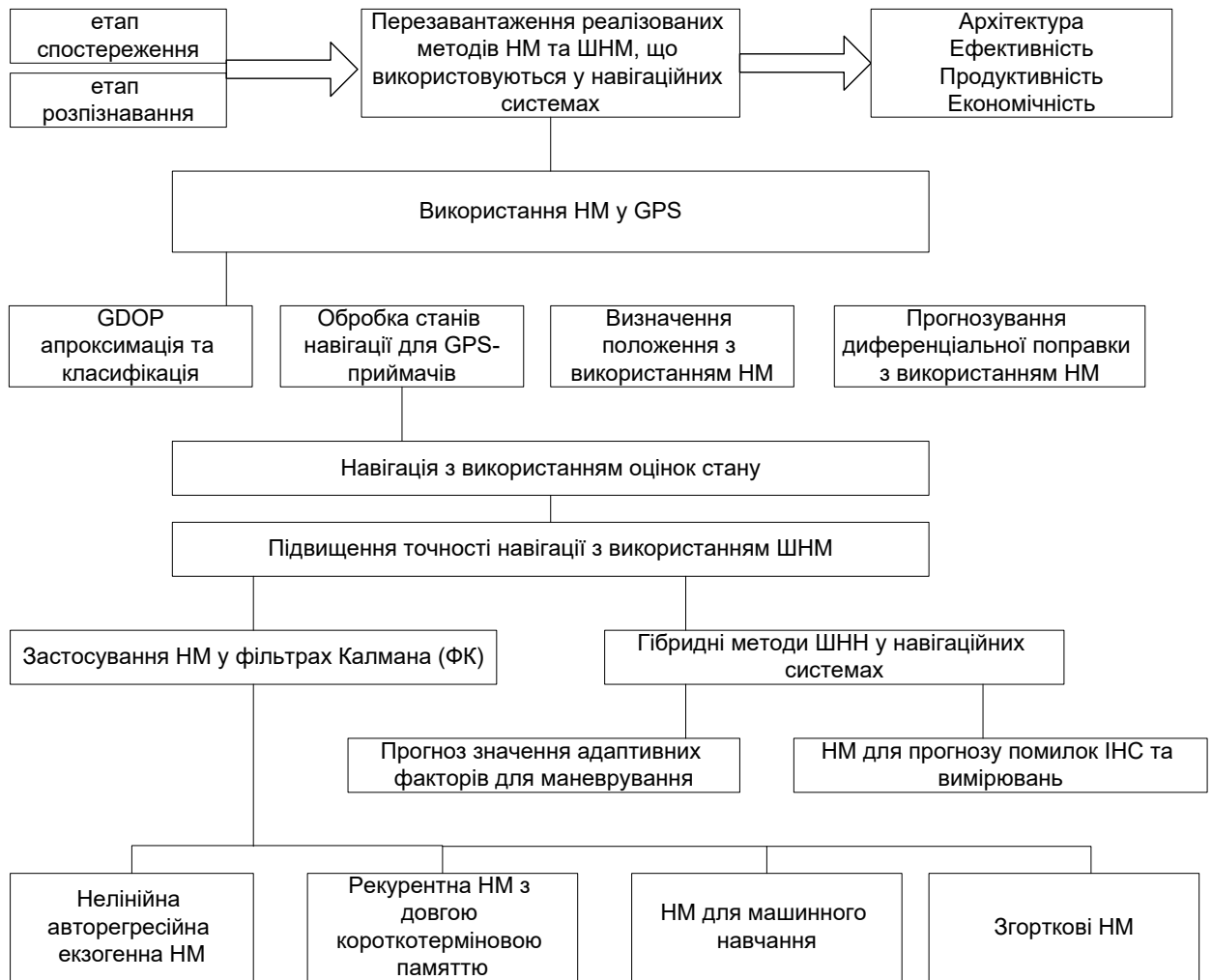


Рисунок 1.11 – Застосування ШНМ та НМ у суднових навігаційних системах
(Джерело – розроблено автором на основі [30, 31, 109])

На рис. 1.12 наведено принцип навчання ШНМ для апроксимації невідомої моделі системи [109]

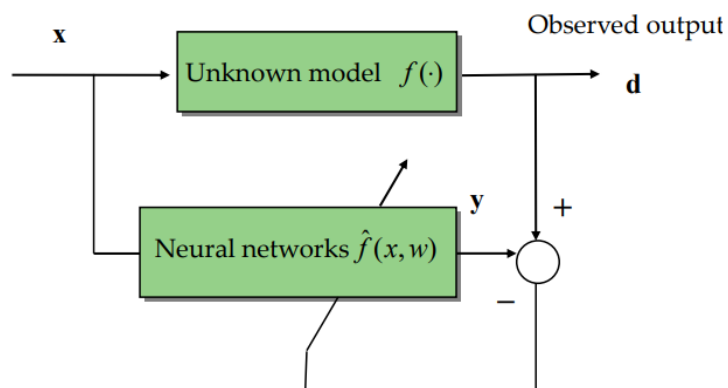


Рисунок 1.12 – Принцип навчання ШНМ [109]

Найпопулярнішою технікою навчання багатошарової ШНМ є пряме поширення. На рис. 1.13 [109] наведено НМ з прямим поширенням (НМПП). Також існують НМ зі зворотним поширенням (НМЗП). З точки зору вхідного, прихованого та вихідного шарів разом узятих, вона є простою в реалізації та працює ефективно. НМЗП є найпоширенішою серед усіх нейронних мереж, хоча й визнано, що вона має певні обмеження, наприклад, повільне навчання.

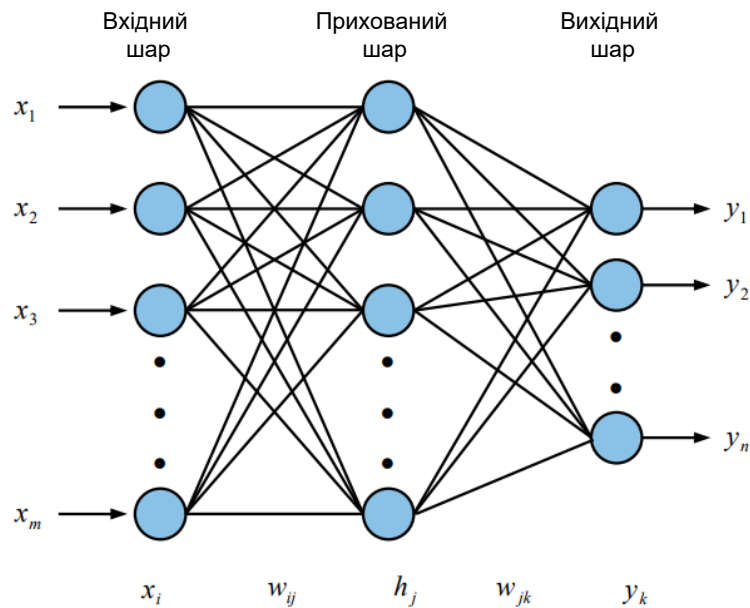


Рисунок 1.13 – Багатошарова ШНМ з прямим поширенням [109]

До складу ШНМ може входити декілька шарів. У кожному шарі присутні вектор зсуву, вихідний вектор та вагова матриця. Багатошарова мережа має кілька шарів, кожен з яких виконує певну функцію. Для мінімізації середньоквадратичної помилки (СКП) алгоритм навчання впливає на параметри системи. В якості результатів роботи системи використовуються бажані результати.

Існують роботи, в яких двошарова нейронна мережа (прямого поширення) вирішує завдання ідентифікації параметрів моделі плоского руху судна. В якості параметрів виступають гідродинамічний коефіцієнт, а також коефіцієнти демпфірування. Вхідний вектор нейронної мережі формує кут перекладки керма й інші величини, що описують рух судна. Для отримання

необхідної кількості зразків використовується імітаційне моделювання. Після ідентифікації параметрів нейронною мережею рівняється робота імітаційної моделі із заданими параметрами й ідентифікованими. В якості еталонних рухів вибираються циркуляції з повною й половинною (на "півоберта") перекладкою керма. Результат – за період циркуляції відмінність траєкторій становить кілька метрів.

Нейромережеві алгоритми дозволяють враховувати зазначені особливості, будучи спеціально орієнтованими для рішення подібного роду завдань. Як відомо, нейронні мережі можуть виступати в якості універсального апроксиматора функцій декількох змінних, що робить їх достатньо перспективним інструментом для рішення завдань апроксимації траєкторії руху судна. Більше того, нейронна мережа, що моделює динаміку судна, навчається на основі зразків, отриманих з використанням рівнянь руху судна (кінематичних або диференціальних динамічних).

Зчислення шляху судна може виконуватися з використанням різного набору навігаційних датчиків. Вихідний сигнал системи зчислення може представляти собою координати судна, їх збільшення, що становлять відносну швидкість та інші величини. Звичайно, самим бажаним варіантом буде випадок, коли система зчислення визначає координати судна або хоча їх приріст. Перевага використання в якості виходу мережі саме координат має два аспекти.

По-перше, зчислені координати є шуканими параметрами, і такий "координатний" варіант дозволяє не проводити додаткові процедури чисельного інтегрування, як це має місце при використанні в якості виходу мережі швидкості а, тим більше, прискорення.

По-друге, координати можуть бути виміряні у судових умовах (на основі супутникових навігаційних систем) з високою точністю без використання спеціального обладнання, яке не є типовим для стандартного морського судна.

Вхідними сигналами системи нейрозчислення можуть бути або сили,

що впливають на корпус судна по мірі його руху, або величини, значення яких використовуються при розрахунках зазначених сил. Останній варіант більш бажаний, оскільки є універсальним та не залежить від вибору того або іншого алгоритму розрахунків кожної сили.

У ряді випадків доцільним є попередня обробка сигналів нейронних мереж для підвищення якості їх навчання.

Визначивши зміст вхідного й вихідного вектора, можна приступати до вибору моделі нейронної мережі, що перетворить вхідний сигнал у вихідний. Слід визначити тип (загальну архітектуру) мережі, кількість шарів у ній, нейронів у кожному шарі, тип їх функції активації, а у випадку динамічної мережі – ще й кількість одиничних затримок по входу й виходу.

Питання вибору й властивостей архітектури нейронних мереж для рішення різних завдань розглядаються в ряді робіт, в яких, як правило, приводяться описи нейромережових моделей, що добре зарекомендували себе для рішення різного класу завдань (апроксимації функцій, розпізнавання образів, прогнозування часових рядів).

Вибір моделі нейронної мережі передувє наступному етапу, на якому виконується її навчання. При цьому виникає проблема розробки методу отримання необхідної кількості та якості зразків. Важливу роль відіграє також вибір того або іншого методу навчання нейронної мережі.

Після синтезу нейромережової системи прогнозування руху судна та її навчання виконується перевірка її працездатності в таких навігаційних ситуаціях, які не брали участь у навчанні. Оскільки коефіцієнти деяких нейронних мереж визначаються фізичними характеристиками судна, то тестування таких мереж слід виконувати в ході експериментів на конкретному судні. Основне питання при цьому може бути сформульоване у такий спосіб: «Які навігаційні ситуації охоплює тестування; і яка ймовірність, що мережа буде працювати в інших ситуаціях, не охоплених тестуванням?».

Нарешті, побудова повноцінної системи зчислення закінчується

розробкою алгоритму, за яким може бути оцінена її точність в умовах поточних похибок вимірів і ідентифікації.

Також необхідно відмітити, що на даний час існує ряд зразків автоматизованих систем контролю мореплавності (АСКМ) для прогнозування та оптимізації руху суден. Це – система підтримки прийняття рішень «OCTOPUS–DSS» для забезпечення безпечного плавання в несприятливих погодних умовах. Система дозволяє вибрати оптимальний маршрут, враховує очікувані погодні умови. При розрахунках враховуються багато факторів, які впливають на рух судна. Іноді ці фактори вимагають зниження швидкості судноводієм для забезпечення безпеки руху. Система має програмний модуль для навчання судноводіїв роботі з нею. Модуль формує різні погодні умови, судноводій повинен знайти правильне рішення.

Інтегрована морська система підтримки IMDSS (Integration Decision Support System) – це пакет програм, який дозволяє капітану або вахтовому помічнику покращити планування і виконання рейсу. Судноводій може швидко прийняти ефективні рішення при наявності необхідної гідрометеорологічної інформації. Система відрізняється досконалістю процедур для оцінки мореплавства судна, покращенням його поведінки під час хвилювання.

Суднова система VOSS (Vessel Optimization and Safety System) [2] призначена для запобігання небезпечним ситуаціям у важких погодних умовах. Досвід засвідчив, що використання цієї системи скорочує час затримки шляху до 80% через погодні умови, завдяки їй зменшується кількість пошкоджень вантажу та корпусу.

Таким чином, проблема управління рухом судна за траєкторією у стиснутих водах та на мілководді належить до найактуальніших, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання та потреби подальшого розвитку та вдосконалення методів її вирішення.

Отже науковим завданням дисертаційної роботи є розроблення знання-орієнтованих моделей та методів управління маневруванням суден на мілководді та у стиснутих водах для забезпечення безпеки судноводіння.

1. Під маневром розуміється заздалегідь визначена зміна будь-яких елементів, параметрів руху судна. Маневрування судна визначає можливість забезпечення належної швидкоплинності цього процесу, відповідно втрата маневреності судна призводить до втрати керованості, оскільки без швидкості рух судна стає практично некерованим.

2. Критерії маневреності та керованості пов'язані між собою параметрами руху судна. Дані величини знаходяться в суворій ієрархії між собою. Для визначення цих зв'язків для завдань маневрування та управління судном необхідно уточнити параметри руху судна та визначити їх ієрархічні залежності у процесі виконання маневру.

3. Реалізація маневру у ручному або автоматичному режимі з метою зміни напрямку руху судна безпечною траєкторією проводиться шляхом перекидок керма й полягає в його переміщенні з однієї лінії прямого шляху на іншу або виконанні спеціальних маневрів.

4. Побудова знання-орієнтованих систем, що забезпечують високоточні повороти судна при маневруванні, вимагає вирішення таких завдань:

- здійснити експериментальне дослідження еволюції щодо один одного кінематичних параметрів руху судна на повороті;
- визначити залежності між вхідними та вихідними спостерігаємими параметрами руху судна;
- здійснити ідентифікацію та побудову моделі управління судном на циркуляції;
- здійснити адаптацію ідентифікованої математичної моделі до змінних умов плавання.

5. Проблема управління рухом судна за траєкторією у стиснутих водах та на мілководді належить до найбільш актуальних, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання та потреби подальшого розвитку та вдосконалення методів її вирішення.

6. Науковим завданням дисертаційної роботи є розроблення знання-

орієнтованих моделей та методів управління маневруванням суден на мілководді та у стиснутих водах для забезпечення безпеки судноводіння.

Основні результати, отримані у розділі, опубліковані у роботах здобувача [70, 72, 75].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ МАНЕВРЕНОСТІ СУДНА У СТИСНУТИХ ВОДАХ ТА НА МІЛКОВОДДІ

У даному розділі дисертаційної роботи досліджені особливості маневрування судна на мілководді та у стиснутих водах. Доводиться, що основними факторами, які впливають на маневреність судна у таких умовах, є сили на корпусі та кермі судна, а також стан дна мілководдя.

Удосконалено модель маневрування судна на мілководді та у стиснутих водах, яка, на відміну від існуючих, враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні вода-мул, що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

Отримала подальший розвиток модель розходження суден у стиснутих водах, яка, на відміну від існуючих, враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є елементом системи підтримки прийняття рішень судноводіння та дозволяє підвищити безпеку судноводіння.

Основними результатами, отриманими у розділі є запропоновані моделі, що складають сутність нових наукових результатів.

2.1 Дослідження маневреності судна на мілководді

Маневреність судна залежить від глибини води h району плавання по відношенню до осадки T судна. Існує досить умовне розмежування між глибокими акваторіями ($h/T > 3,0$), акваторіями з середніми глибинами ($1,5 < h/T < 3,0$), мілководними акваторіями ($1,2 < h/T < 3,0$) неглибокими ($1,2 < h/T < 1,5$) та мілководдям ($h/T < 1,2$) [1]. Вплив обмежень на глибину помітний вже на середніх глибинах, дуже значний в неглибокій акваторії й

домінує в поведінці судна на мілководді.

У поглиблених каналах та стиснених водах, що забезпечують доступ до морських портів, глибина під кілем (англ. – under keel clearance, UKC), що визначається як $(h - T)/T$ й виражається у відсотках від осадки, зазвичай приймає значення 10-20% на захищених ділянках і 15-40% на ділянках, що піддаються впливу хвиль та хвилювання.

Це означає, що судноводіння на мілководді є звичайною практикою у стиснутих водах (наприклад, в портах та на підходах до них). У таких навігаційних зонах, які характеризуються обмеженою глибиною та шириною, морські судна часто стикаються з абсолютно іншими умовами плавання порівняно з навігацією у відкритому морі. Більшість суден спроектовані та оптимізовані саме для навігації у відкритому морі.

Окрім впливу обмеженої глибини, судну також доводиться рухатися в умовах стисненої акваторії, що характеризується наближеністю берегів, активним судноплавством, течіями, обмеженнями швидкості. У таких ситуаціях, як правило, залучають лоцмана. Для суден внутрішнього плавання водні шляхи з обмеженою глибиною і шириною можуть розглядатися як природне середовище існування.

Наприклад, згідно з правилами користування водними шляхами [2], глибина внутрішнього водного шляху для комерційного судноплавства з нормальним профілем повинна бути щонайменше 1,4 осадки еталонного судна, яка може бути зменшена до 1,3 для водних шляхів з вузьким або односмуговим профілем.

Проведемо аналіз впливу мілководдя на маневрені операції суден.

Обмеження глибини води значно змінює розподіл тиску навколо судна, що рухається, і, головним чином, призводить до збільшення гідродинамічних сил, пов'язаних з рухом судна у воді. Крім збільшення опору судна, обмеження глибини загалом призводить до зниження його маневреності, що проявляється за результатами стандартних маневрів.

Однак більшість суден виконують такі маневри лише під час

випробувань, які завжди проводяться на великій глибині, тому інформація про маневри суден на обмеженій глибині здебільшого базується на симуляціях або модельних дослідженнях. Результати повномасштабних експериментів трапляються досить рідко; найвідомішим винятком є програма випробувань Esso Osaka [3]. У 1977 році були проведені маневрові випробування цього нафтоналивного судна дедвейтом 278 000 тонн у Мексиканській затоці з осадкою 320%, 50% та 20% від нормальної осадки. Порівняно з глибокою водою характерні розміри кола повороту в цілому монотонно збільшуються зі зменшенням глибини води, як це наведено на рис. 2.1 (ліва частина).

Очевидно, що залежність маневреності в нижньому діапазоні УКС є дуже суттєвою: невелике зменшення УКС призводить до значного збільшення розмірів кола повороту судна. Як наслідок, у мілководних навігаційних каналах потрібні більші радіуси повороту. На рис. 2.1 також наведено зменшення кута дрейфу в сталому повороті порівняно з глибокою водою, що призводить до вужчої траєкторії руху та відносно меншого зменшення швидкості судна в повороті.

Глибина води також впливає на здатність судна тримати курс: на значному мілководді кути перерегулювання під час зигзагоподібних тестів значно менші порівняно з глибокою водою. Незважаючи на цей очевидний позитивний ефект (рис. 2.1, права частина), експерименти мають значно більшу тривалість, оскільки швидкість riskання значно нижча на мілководді. Однак, характеристики маневрування певних типів суден можуть відхилятися від цієї загальної закономірності на середніх глибинах. Наприклад, у випадку Esso Osaka при 50% УКС, випередження є дещо меншим порівняно з глибокою водою.

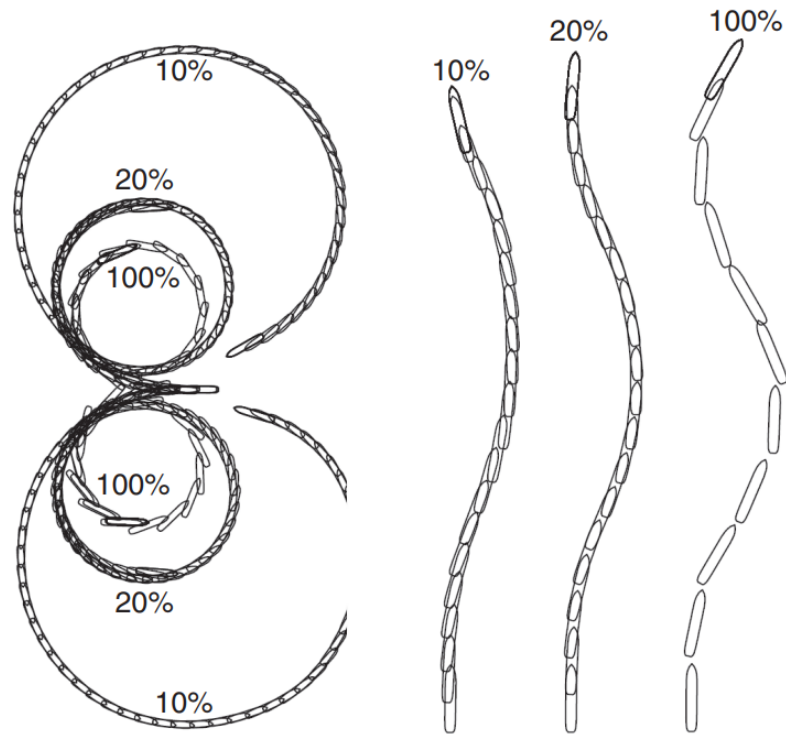


Рисунок 2.1 – Випробування судна по колу та зигзагу 20/20 при 10%, 20% та 100% UKC (Джерело – розроблено автором)

Кути проскакування, спостережувані під час зигзагоподібних тестів, також збільшуються на середньому діапазоні глибин води. Така поведінка зазвичай спостерігається для повних форм суден. У виняткових випадках радіус повороту може навіть зменшуватися зі зменшенням глибини – судно з широкою балкою (малим L/B) та малою осадкою (малим T/B) повертається легше. Обмеження глибини води також впливають на прямолінійну остійність. Хоча зменшення UKC спочатку може мати негативний вплив на курсову остійність (як це спостерігалось у випадку Esso Osaka при 50% UKC) [1], на мілководді динамічна остійність зростає зі зменшенням глибини.

Таким чином, курсова стійкість та маневреність судна значно змінюються залежно від наявного коефіцієнта диференту особливо в природних водних шляхах (річки, естуарії), де глибина води може значно змінюватися як за довжиною каналу, так і протягом припливно-відпливного циклу, а маневрені характеристики судна можуть зазнавати значних змін під час проходження каналу.

2.2 Моделі сил на корпусі та кермі судна під час маневрування на мілководді

2.2.1 Сили на корпусі судна

Дослідимо вплив обмеженої глибини води на корпус та сили на корпусі та кермі під час маневрування.

Динамічна рівновага рухомого судна вимагає рівноваги між інерційними силами і моментами та гідродинамічними діями на корпус судна, гвинт та кермо. Для маневруючого судна кінематика та динаміка в горизонтальній площині є основним предметом уваги, хоча шість ступенів свободи не є незалежними. Це означає, що при дослідженні маневрування основна увага приділяється бічним силам та моментам рискання.

Бічна сила (Y) та момент рискання (N), що діють на корпус судна, викликані гідродинамічною реакцією на рух судна відносно води, які можна розглядати як функції швидкості руху судна по воді, розкладеної на поздовжню (u) та поперечну (v) складові швидкості в нерухомій до судна системі координат, а також швидкість рискання (r) та відповідні прискорення \dot{u} , \dot{v} та \dot{r} . Найважливіші сили, що залежать від прискорення, та момент часто позначаються: $Y_{\dot{v}}(\dot{v})$ та $N_{\dot{r}}(\dot{r})$.

$N_{\dot{r}}$ є доданою масою для хитавиці, а $Y_{\dot{v}}$ є доданим моментом інерції для рискання. У той час як на глибокій воді додана маса на хитавицю, як правило, дещо менша за масу судна, її значення може збільшуватися в 4-5 разів на мілководді, як наведено на рис. 2.2.

Отже, інерція судна значно зростає при зменшеному UKC, що призводить до більш повільної реакції судна на управляючі дії. Аналогічна тенденція спостерігається для сил та моментів, що залежать від швидкості хитання та рискання. Завдяки своїй формі в горизонтальній площині корпус

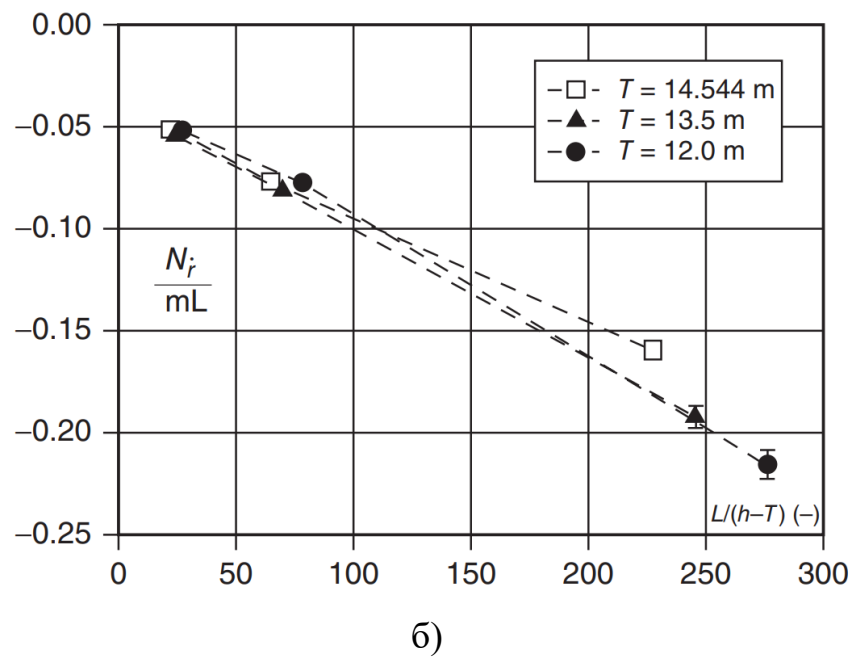
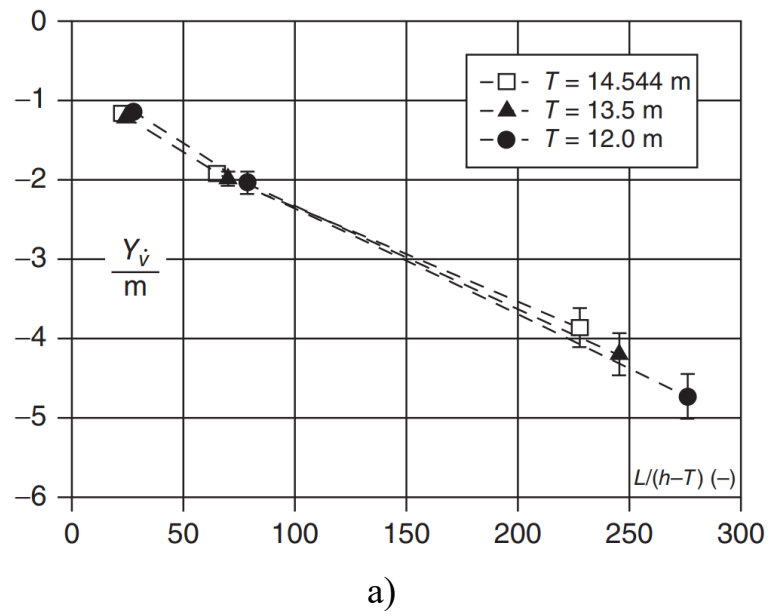


Рисунок 2.2 – Безрозмірна маса, що додається до хитавиці (а) та момент інерції, що додається до рикання (б) як функція безрозмірного UKS для моделі контейнеровоза
(Джерело – розроблено автором)

судна можна інтерпретувати як профіль, що генерує підйомну силу, з хордою L та товщиною B . Співвідношення сторін цього профілю дуже низьке: на глибокій воді ефективне значення можна розглядати як $2T/L$, де другий фактор обумовлений наявністю вільної водної поверхні.

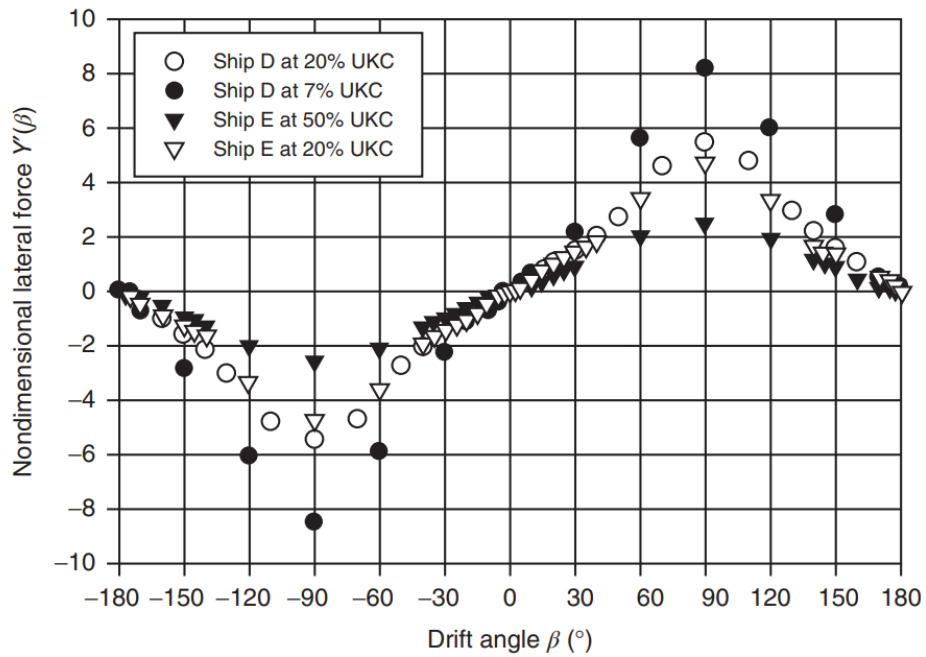
Зі зменшенням УКС перехресний потік між обома бортами судна все більше ускладнюється, що еквівалентно збільшенню співвідношення його сторін. У граничному випадку $\frac{h}{T} = 1$, коли перехресний потік неможливий, еквівалентне співвідношення сторін можна вважати нескінченним, а потік навколо корпусу – двовимірним.

В результаті гідродинамічна бічна сила і момент рискання, що діють на судно, яке рухається з постійною швидкістю під кутом дрейфу, значно зростають зі зменшенням УКС, як наведено на рис. 2.3.

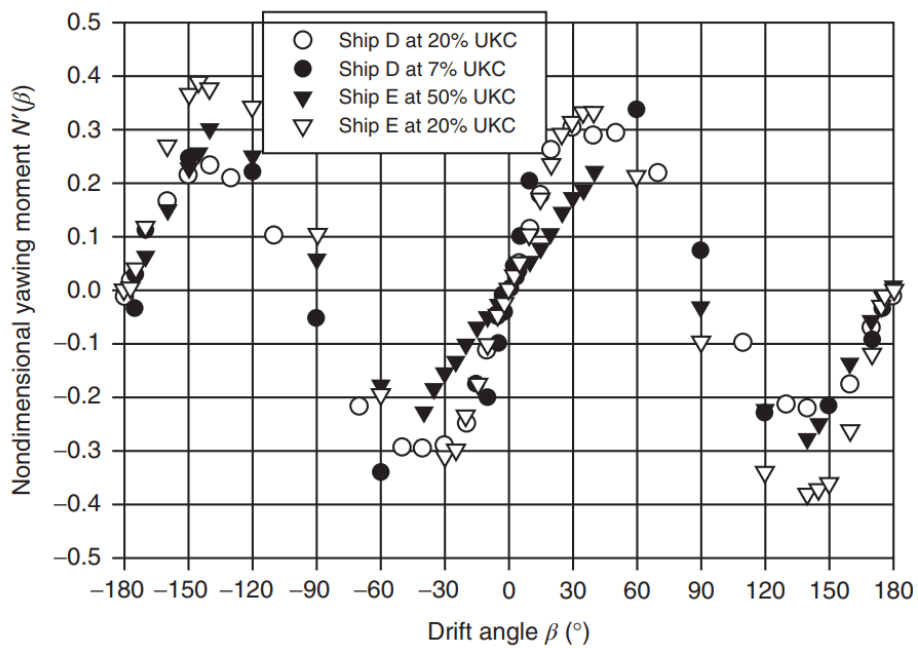
Аналогічно, викликаний швидкістю рискання момент рискання судна поступово зростає зі зменшенням УКС. Чисте рискання судна також викликає гідродинамічну бічну силу, яка на великих глибинах практично нехтується порівняно з відцентровою силою інерції. Однак на мілководді та стиснутих водах ця гідродинамічна бічна сила стає все більш важливою і спостерігається протидія відцентрової сили інерції, в результаті гідродинамічних та інерційних сил може навіть стати доцентровими при дуже низьких УКС.

2.2.2 Сили на кермі судна

Сили на самому кермі загалом не змінюються суттєво на мілководді. Проте, на потік до керма впливають обмеження УКС: збільшене хвилювання зменшує приплив, в той час як, з іншого боку, більше навантаження на гвинт збільшує швидкість, що викликається гвинтом. Обидва ефекти компенсують один одного, що у більшості випадків призводить до збереження паритету.



a)



б)

Рисунок 2.3 – Безрозмірна бічна сила (а) та момент рискання (б) як функція кута дрейфу $\beta = \tan^{-1}(-v u^{-1})$ для двох моделей суден:

(D – контейнеровоз, E – танкер) при різних UKC

(Джерело – розроблено автором)

Дія керма викликає асиметричну течію, яка призводить до асиметричного розподілу тиску по обидва боки керма і, в кінцевому підсумку, створює бічну силу на кермі, яка в судновій системі координат позначається як Y_R .

Асиметрія поля тиску не обмежується тільки кермом, а поширюється на кормову частину корпусу судна. Інтегрування тиску, викликаного дією керма на корпус судна, призводить до виникнення бічної сили, яку можна сформулювати як частку $a_H Y_R$ від сили на кермі.

На глибокій воді a_H є досить малою і точка прикладання сили, викликаной дією керма, знаходиться біля корми судна. Зі зменшенням УКС величина цієї сили значно зростає, оскільки точка її прикладання переміщується далі вперед, вплив на момент ристання стає менш важливим і може мати негативний вплив на керування у випадку, коли сила, викликана кермом, прикладена в носовій частині судна.

2.3 Дослідження маневреності судна у стиснених водах

У стиснених водах на поведінку судна впливають бічні бокові обмеження району плавання, такі як береги та причальні стінки. Ці обмеження можуть впливати на течію та поле тиску навколо судна і, отже, на гідродинамічні сили і моменти, які діють на корпус судна.

Розрізняють різні типи впливу, які залежать від відносного руху судна відносно водного шляху [4]:

- ефекти берега визначаються як сили і моменти, що діють на судно внаслідок руху, який має переважно паралельну орієнтацію по відношенню до берега;

- ефекти подушки виникають, коли судно рухається у бічному напрямку до твердої межі, що, як правило, призводить до збільшення бічної сили на корпус судна зі зменшенням надводного борту (наприклад, при

швартуванні до причальної стінки);

– бічні обмеження впливають на частотні характеристики судна і, отже, гідродинамічні ефекти пам'яті виникають у випадку великих прискорень або сповільнень.

Далі зосередимося на ефектах берега, які, в основному, виникають, коли судно рухається в навігаційному районі, що є асиметричним по відношенню до траєкторії, якою воно слідує. Судно, що рухається вздовж осі каналу з постійним симетричним поперечним перерізом, не відчуває бічної сили або моменту рискання, а лише збільшення опору. Однак, якщо судно рухається ексцентричним курсом, або якщо зона руху асиметрична, потік навколо судна створить асиметричне поле тиску, що призведе до виникнення бічної сили і моменту рискання.

Загалом, відносна швидкість води з боку найближчого берега буде більшою, ніж на відкритій стороні акваторії. За законом Бернуллі, тиск і, відповідно, рівень води зменшиться більше з боку найближчого берега, ніж на відкритій стороні. Таким чином, результуюча сила буде штовхати судно до найближчого берега. З цієї причини це явище часто називають присмоктуванням до берега. Оскільки депресія рівня води більша біля корми, тоді як носова хвиля може навіть призвести до надлишкового тиску біля носа, ця бічна сила супроводжується моментом рискання, який відводить ніс судна від найближчого берега (момент крену). Наближеність до берега також призводить до підвищеного опору судна, а також модифікованої поведінки крену і диференту.

Дослідимо показники, які визначають вплив берега на маневрування суден.

Сили і моменти взаємодії судна з берегом залежать від декількох показників [4]:

– відстані між судном і берегом. Загалом, ефекти взаємодії збільшуються зі зменшенням відстані до берега, хоча момент рискання може в деяких випадках зменшуватися при дуже малих відстанях;

– швидкості судна. Оскільки в ефектах взаємодії з берегом переважають ефекти Бернуллі, вони, як правило, пропорційні квадрату швидкості судна, хоча на мілководді сили та моменти зростають навіть більше, ніж в квадратичній прогресії;

– відношення глибини води до осадки судна. Момент рискання при взаємодії судна з берегом монотонно зростає зі зменшенням УКС і стає достатньо великим на мілководді. Бічна сила спрямована до найближчого берега на середніх глибинах та мілководді, але натурні випробування з буксированими моделями суден засвідчили, що на значному мілководді рівень води між бортом судна та найближчим берегом підвищується, так що відбувається відштовхування від цього берега, якщо h/T менше критичного значення в діапазоні 1,1-1,25;

– дії гребного гвинта. Швидкість, що створюється гребним гвинтом, змінює розподіл тиску біля корми, в результаті чого виникає додаткова сила притягування між кормою і берегом, яка посилює момент відштовхування. При дуже низьких h/T ефект відштовхування від берега, що спостерігається для буксированих моделей, змінюється на ефект притягування до берега для рухомих моделей завдяки цьому ефекту. Більшість з цих параметрів та їх вплив на вплив на берег не є незалежними один від одного.

Відстань між судном і берегом та геометрія берега.

Якщо відстань від борту судна до вертикальної стіни можна визначити однозначно, то менш очевидно, як визначити відстань до похилого або зануреного берега. За цієї причини кілька авторів сформулювали вирази для еквівалентної відстані між судном та берегом або для впливу геометрії берега на сили взаємодії між судном і берегом. У 1970-х роках, з появою дуже великих нафтоналивних суден, Норбін провів вимірювання сил у стиснених водах та випробування траєкторії вільного руху моделі танкера вздовж різних берегів з метою розробки аналітичного формулювання для бічної сили і моменту рискання, зумовлених наявністю вертикального берега, як функцій від h/T та безрозмірної відстані між судном і берегом η_0 (рис. 2.4 (а)). Для

похилих берегів було сформульовано коефіцієнт множення як функцію коефіцієнта нахилу k , а також коефіцієнт ослаблення $e^{(-2h_1)/(h-h_1)}$ для затоплених берегів [5].

Аналітичні моделі Норбіна, хоча і базуються лише на одній моделі судна, часто використовуються при моделюванні маневрування суден завдяки простоті формулювань та відносно легкому визначенню параметра відстані до берега. На ділянках каналу береги по лівому і правому борту мають протидіючу дію: ряд дослідників [6] розширили дослідження Норбіна, засновані на модельних тестах, включивши різні типи суден, розробили узагальнені математичні моделі, а також ввели безрозмірний параметр відстані між судном і берегом y_{B3} , що базується на відстанях до кожного берега, виміряних при половинній осадці (рис. 2.4 (б)):

$$y_{B3} = \frac{B}{2} \left(\frac{1}{y_{p3}} + \frac{1}{y_{s3}} \right). \quad (2.1)$$

Для врахування більш складних, навіть довільних поперечних перерізів каналу, еквівалентний безрозмірний параметр відстані до берега ($d2b$) був розроблений дослідниками [7] на основі функції розподілу ваги: $w(y, z) = e^{-a|y|-b|z|}$ у прив'язаній до судна системі координат (рис. 2.4 (в)), який можна розглядати як розширення коефіцієнта, введеного Норбіном [5]:

$$\frac{1}{d2b} = \frac{\chi_{ship}}{2} \left(\frac{1}{\chi_{stb}} - \frac{1}{\chi_{port}} \right), \quad (2.2)$$

де χ означає інтеграл від функції розподілу ваги за площею, зазначеною в підписі: “ship” означає поперечний переріз судна, а “stb” і “port” – частину поперечного перерізу каналу по правому та лівому борту, відповідно, від осі симетрії поперечного перерізу судна.

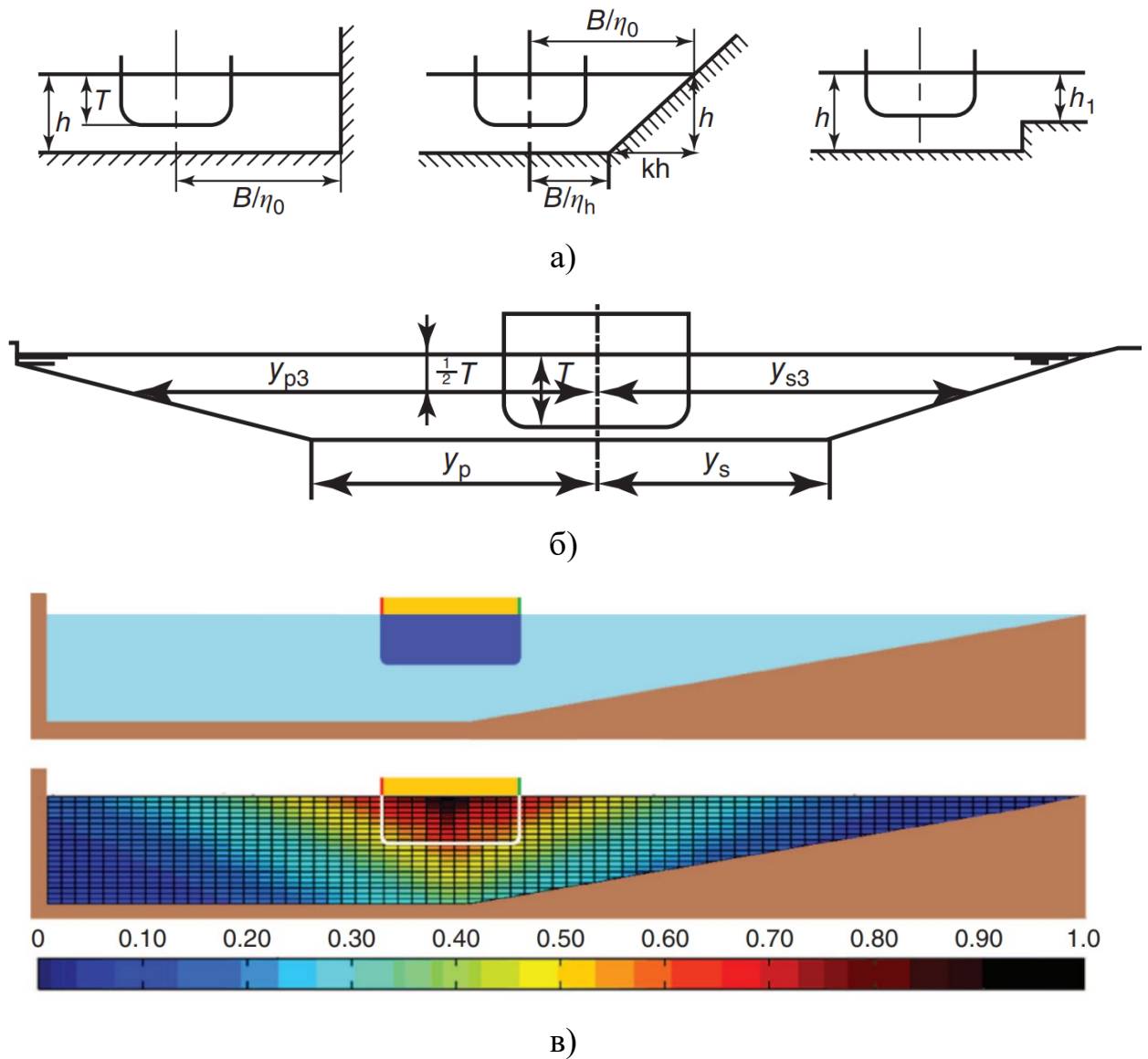


Рисунок 2.4 – Показники відстані між судном та берегом:

(а) Конфігурації берега [5]; (б) Визначення за [6];

(в) Функція розподілу ваги, визначена за [7]

(Джерело – [5], [6], [7])

Бічна сила, викликана креном, і момент відхилення зростають більше ніж квадрат швидкості судна. На основі комплексної серії модельних тестів ряд дослідників [8] дійшли висновку, що ефекти берега пропорційні величині $\frac{V^2/V_{crit}^2}{\sqrt{1-(V^2/V_{crit}^2)}}$, де V_{crit} – критична швидкість судна на водному шляху, яка є функцією коефіцієнта блокування m і середньої глибини води в каналі [9]:

$$V_{crit} = \sqrt{gh_{avg}} \left(2 \sin \left(\frac{\arcsin(1-m)}{3} \right) \right)^{3/2}. \quad (2.3)$$

Залежність (2.3) дійсна для підкритичних швидкостей приблизно до $0,84V_{crit}$. В якості альтернативи для класичного визначення коефіцієнта блокування m , тобто співвідношення між поперечним перерізом судна та поперечним перерізом каналу, можна визначити альтернативний еквівалентний коефіцієнт блокування m_{eq} , враховуючи функцію розподілу ваги: $w(y, z) = e^{-a|y| - b|z|}$.

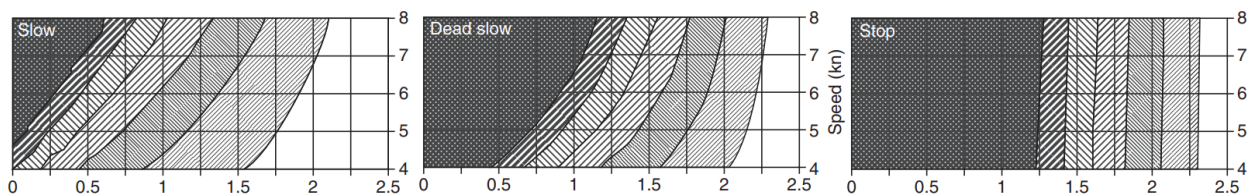
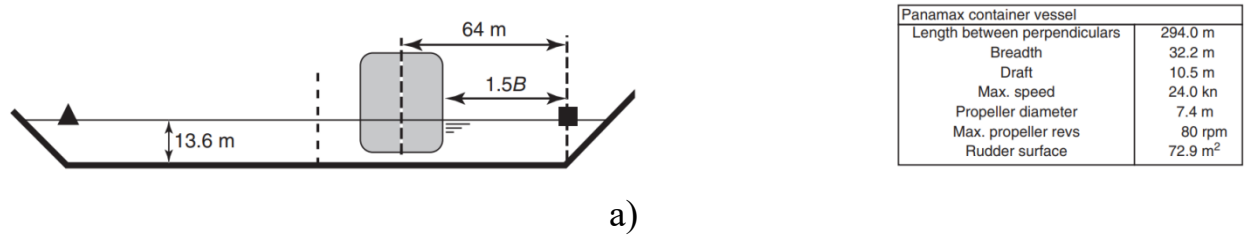
Це дозволяє враховувати ексцентричне положення судна в каналі, а також довільну геометрію берега.

Для збереження ексцентричного бокового положення в каналі, потрібна дія керма, що спрямовує носову частину до найближчого берега з метою компенсації моменту відхилення, спричиненого креном. Така ситуація може виникнути у двосторонньому каналі, оскільки перед зустріччю судна шикуються вздовж умовної лінії.

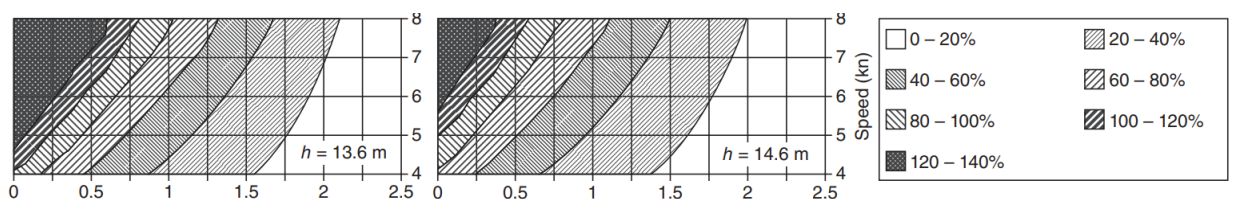
Для конкретного судна в заданих умовах завантаження із заданим УКС кут керма, необхідний для компенсації сил, викликаних креном, залежить від швидкості судна, застосованої швидкості гвинта та відстані між судном і берегом. Для точного налаштування двигуна необхідну потужність керма для протидії ефекту крену можна розрахувати для кожної комбінації швидкості та бокового положення.

В якості прикладу наведемо типовий контейнеровоз Panamax, який зустрічає подібне судно в Gaillard Cut, найвужчому місці Панамського каналу. У цьому місці судно, яке готується до зустрічі, залишить відстань приблизно $1,5B$ до лінії буя. На рис. 2.5 наведено залежності впливу швидкості обертання гвинта на керованість судна. Наприклад, судну, що пливе на зустрічній лінії зі швидкістю 6,5 вузлів, потрібно 38% потужності керма, щоб протидіяти ефектам крену у стиснутих водах з повільним рухом,

збільшуючись до 70% при дуже повільному русі й 85% із зупиненим гвинтом. Також проводиться порівняння з покращеною ситуацією після поглиблення русла. Для судна з повільним двигуном необхідна потужність керма падає з 38% до 25%, якщо глибина збільшується до 14,6 м, через високу чутливість сил, викликаних креном, щодо змін УКС.



б) по осі ОХ відстань до лінії буя/ширини судна, по осі ОУ швидкість (вуз.)



в)

Рисунок 2.5 – Контейнеровоз Panamax, що рухається в Gaillard Cut:

- а) геометрія судна та каналу; б) необхідна потужність на кермі при різних швидкостях гвинта як функція швидкості судна та відстані до буя;
в) необхідна потужність керма: ефект каналу поглиблення [10]

(Джерело – [10])

2.4 Розроблення моделі маневрування судна на мілководді та у стиснутих водах

На мілководді через утворення на дні осаду потрібні постійні роботи з днопоглиблення. Це забезпечить доступність портів для глибокоосадкових

суден. У разі твердого дна (каміння, глина, пісок) глибину можна однозначно виміряти за допомогою ехолотних методів. Однак, якщо дно вкрите м'якими шарами мулу, межу між водою та дном може бути важко визначити, оскільки результати дослідження залежатимуть від застосованої ультразвукової частоти: у той час як високочастотні відгуки (наприклад, 210 кГц) відбиваються від поверхні мул-вода, нижчі сигнали (наприклад, 33 кГц) проникають глибше в мул. Різниця між обома сигналами може коливатися від кількох дециметрів до навіть 3–4 метрів. Хоча верхня частина цього шару може бути рідкою (чорна вода), щільність і реологічні властивості (в'язкість та межа текучості) шару поступово збільшуються з глибиною.

У цьому випадку необхідно ввести концепцію морського дна, визначену [1] як рівень, на якому фізичні характеристики дна досягають критичної межі, за якою контакт з кілем судна викликає або пошкодження, або неприйнятний вплив на керованість та маневреність. Діапазон застосування цього визначення не обмежується мулистим дном. У разі твердого дна (наприклад, скелі) контакт з дном спричинить пошкодження, тоді як контакт із мулистим дном швидше призведе до неприйнятної поведінки судна в русі, що особливо складно при маневруванні.

Концепція морського дна була запроваджена в 1970-1980-х роках у кількох західноєвропейських гаванях. Загальною практикою є вибір критичної щільності як критерію для визначення морського дна, як правило, близько $1,2 \text{ т/м}^3$, оскільки цю характеристику можна виміряти на місці відносно простим й однозначним способом. Однак реологічна поведінка текучого мулу не залежить безпосередньо від щільності осаду, а залежить від його складу. Зрештою, реологія мулу важливіша за щільність, оскільки саме реологія визначає, чи буде він поводитися як рідина, чи як твердий матеріал. Через складність реології мулу поки що неможливо використовувати реологічний критерій для визначення характеру морського дна.

Проблеми технічного обслуговування та днопоглиблення в гаванях призвели на поточні дослідження седиментології осаду, а також на поведінку

суден, що рухаються зі зниженим мулу рівномірним негативним UKC по відношенню до межі осаду та води (далі позначимо як UKCi).

На поведінку судна, що треба враховувати в моделі, може впливати наявність мулу через два явища:

- реологія мулу, яка має особливе значення, якщо відбувається контакт між шаром мулу та кілем судна;
- генерація хвилястості (внутрішніх хвиль) на межі розділу “вода”-“мул”, яка впливає не тільки на обтікання судна, що контактує з шаром мулу, але й при русі судна з обмеженим коефіцієнтом диференту UKCi.

Характер внутрішніх хвиль залежить від швидкості судна. На дуже низькій швидкості поверхня розділу залишається практично непорушеною. На середній швидкості під носом судна спостерігається просідання поверхні дна, яке на певній ділянці переходить у підняття. Цей внутрішній гідравлічний стрибок перпендикулярний до поздовжньої осі судна, і його величина збільшується при русі до корми зі збільшенням швидкості (другий діапазон швидкостей). На більш високих швидкостях інтерфейсний стрибок відбувається за кормою (третій діапазон швидкостей), зі збільшенням кута між курсом судна і напрямком поширення стрибка (рис. 2.6).

Виникнення цих діапазонів швидкостей можна пояснити за допомогою спрощеної теорії, припускаючи, що і вода, і мул є ідеальними, нев'язкими рідинами. Для судна, що рухається на малій швидкості над шаром мулу, динамічна рівновага призводить як до занурення, так і до підняття поверхні розділу “вода”-“мул”, тоді як для швидкостей, що перевищують критичне значення U_{crit} , можливе лише занурення.

$$V_{crit} = \sqrt{\frac{8}{27} g h_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}, \quad (2.4)$$

де h_1 – глибина шару води, а ρ_1 та ρ_2 позначають густину води і мулу відповідно.

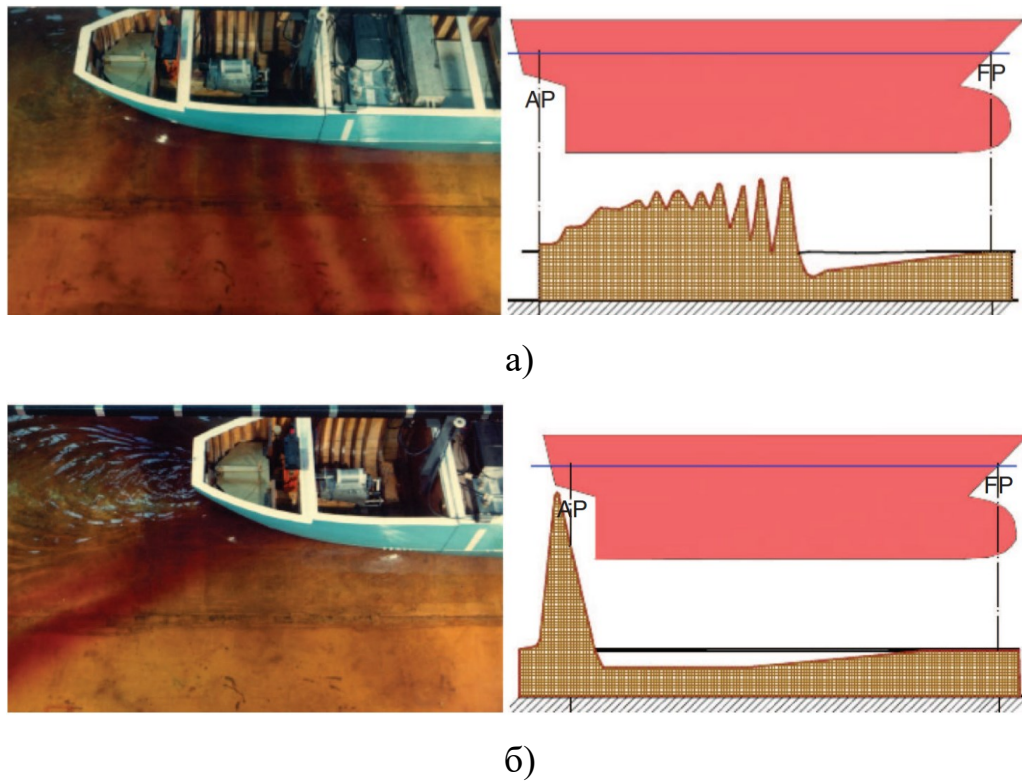


Рисунок 2.6 – Хвилястість поверхні розділу мул-вода: другий діапазон швидкостей (а) та третій діапазон швидкостей (б) [10]

(Джерело – [10])

З даних (рис. 2.7) видно, що критичні швидкості знаходяться у звичайному діапазоні, в якому відбувається підхід до мілководної гавані.

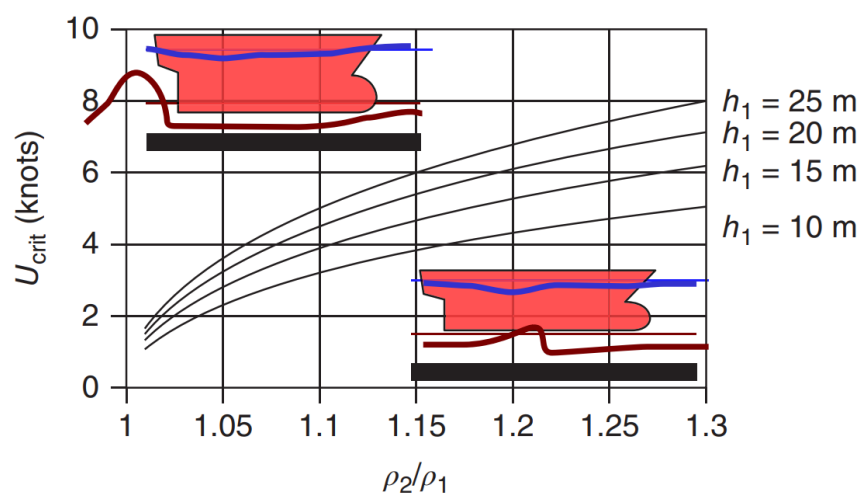


Рисунок 2.7 – Критична швидкість, що розділяє другий і третій діапазони швидкостей як функція відношення густини мулу до води для різних глибин [28]

(Джерело – [28])

Для розуміння маневреності судна в мулистих районах цікавими є такі тенденції:

- умови гідродинамічної інерції значно зростають зі зменшенням глибини води і збільшенням щільності та в'язкості мулу (рис. 2.8). Якщо киль судна глибоко занурюється в мул, спостерігаються дуже великі значення, але навіть коли контакту не відбувається, характеристики шару мають важливий вплив. Для постійного значення УКСі ефект мілководдя зменшується зі збільшенням товщини шару і зменшенням щільності та в'язкості мулового розчину. При нульовому значенні УКСі різкого переходу не спостерігається;

- бокова сила, викликана дрейфом, і момент рискання значно зростають зі зменшенням глибини води. Однак це зростання зупиняється, коли киль торкається поверхні розділу фаз. Для заданого додатного УКСі наявність мулового шару мінімізує вплив мілководдя, особливо для шарів з низькою густиною та в'язкістю. З іншого боку, при заданому значенні УКС відносно твердого дна шар мулу завжди має негативний вплив;

- бокова сила, викликана рисканням, відповідає тенденціям, характерним для малих і від'ємних значень УКСі. Результируюча бокова сила навіть стає доцентровою. Перехід від відцентрової до доцентрової сили відбувається при більших значеннях УКСі, коли щільність та в'язкість мулу збільшуються, а товщина шару зменшується. Тому цей ефект не є типовим для мулистих ділянок, а скоріше повинен розглядатися як ефект значного мілководдя. Більше того, викликаний рисканням момент рискання збільшується зі збільшенням густини та зменшенням УКСі.

Сили, спричинені дією керма, залежать від осьового потоку на кермо. Цей потік є функцією швидкості руху, частоти обертання гвинта і коефіцієнта зчеплення керма. На останній суттєво впливає стан дна та УКСі:

- фактор качки зменшується і, відповідно, потік до керма покращується зі збільшенням щільності мулу та збільшенням УКСі. Однак, коли судно глибоко занурюється в м'які шари мулу з низькою щільністю, приплив до керма погіршується;

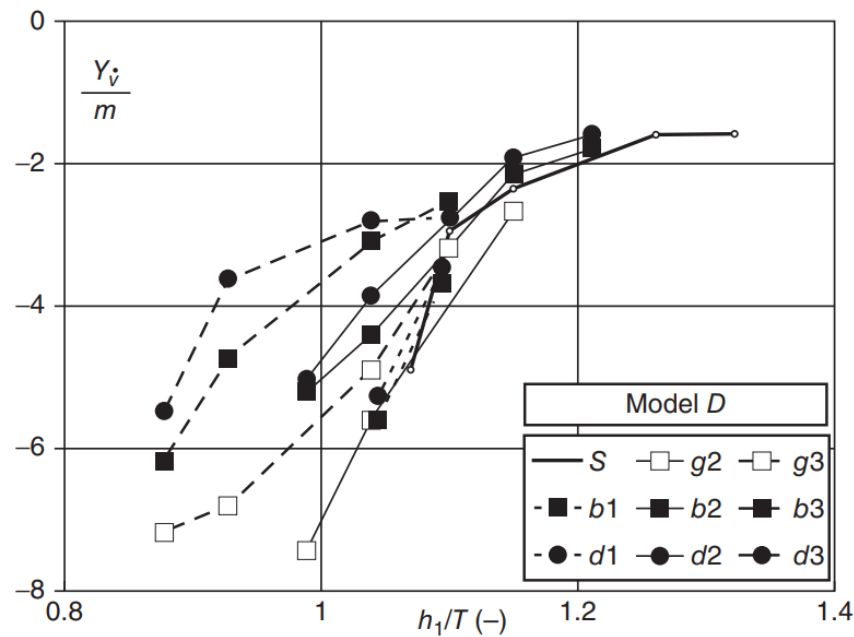


Рисунок 2.8 – Вплив характеристик днища та UKCi на додану масу контейнеровоза при хитавиці
(Джерело – розроблено автором)

На рис. 2.8 позначено: S=тверде дно; g/b/c/d=густина мулу 1,25/1,18/1,15/1,10 т/м³ ; 1/2/3: збільшення товщини шару

– при значеннях UKCi, близьких до нуля, через хвилястість поверхні поділу фаз киль судна торкається як води, так і мулу, що може спричинити нестабільність керма: малі кути повороту керма іноді призводять до неочікуваних ефектів.

Сили, спричинені гребним гвинтом.

Поздовжня сила, що діє на судно під дією гребного гвинта, залежить від тяги гвинта і коефіцієнта зменшення тяги. Більше значення останнього передбачає меншу поздовжню силу при заданій тязі – досягається при позитивному UKCi з шарами мулу високої щільності; при негативному UKCi коефіцієнт зменшення тяги є більшим для найнижчих щільностей.

Тяга гребного гвинта визначається частотою обертання гребного гвинта та осьовою швидкістю припливу. Остання залежить від швидкості судна, а також від фактору хвилювання: більше значення цього фактору означає меншу швидкість припливу і, отже, більше навантаження на гребний

гвинт. На коефіцієнт хвилювання чітко впливають умови дна: він збільшується при плаванні над або через шари мулу низької щільності, в той час як при контакті з шарами мулу високої щільності спостерігається його значне зменшення.

На рис. 2.9 наведено вплив мулу на загальну ефективність гребного гвинта: порівняно з твердим дном спостерігається значна втрата ефективності, особливо при від'ємних значеннях UKCi.

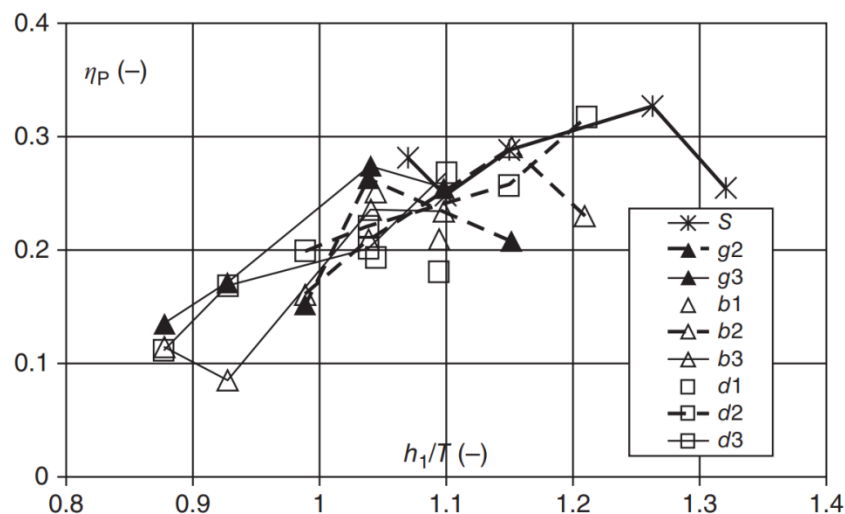


Рисунок 2.9 – Загальний ККД гвинта моделі контейнеровоза: вплив характеристик дна та UKCi
(Джерело – розроблено автором)

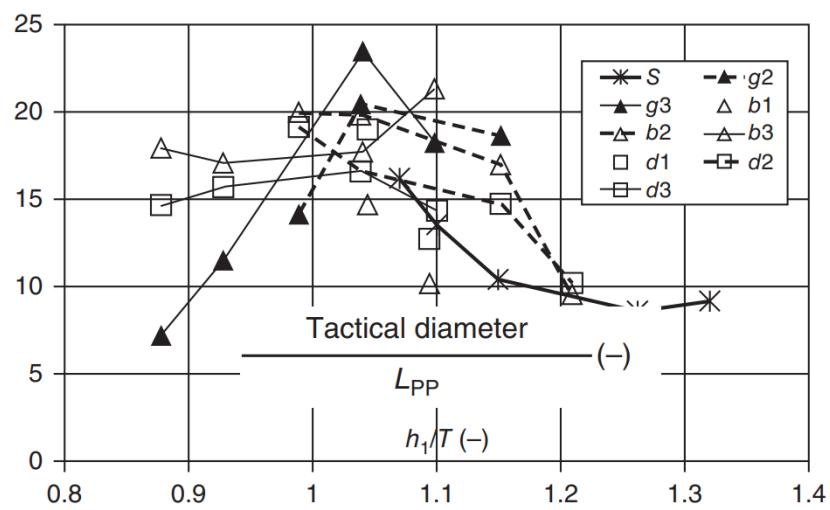
Позначення на рис. 2.9 аналогічні позначенням на рис. 2.8.

Взаємозв'язок між швидкістю руху та частотою обертання гребного гвинта чітко ілюструє вплив хвилястості акваторії на пропульсивні характеристики судна. У другому діапазоні швидкостей задана частота обертання гребного гвинта призводить до значно меншої швидкості над мулистим дном; подібний ефект спостерігався нещодавно під час натурних спостережень [29]. Для досягнення третього діапазону швидкостей, де ефект мулу практично зникає, потрібно докласти більше зусиль.

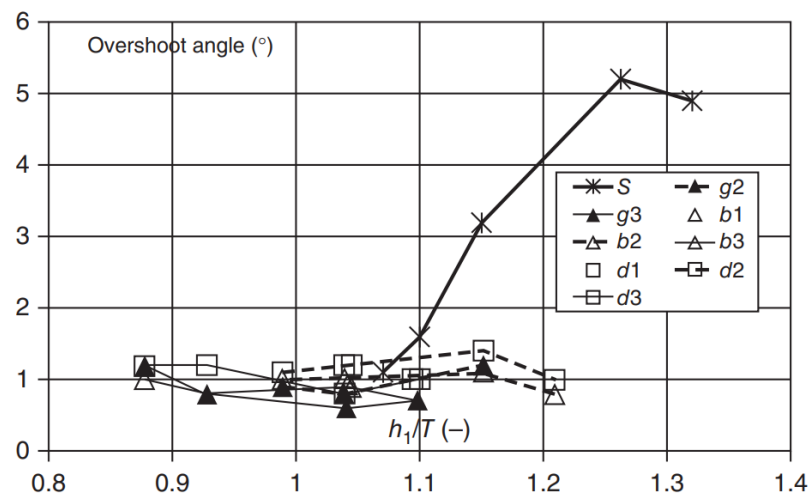
Перехід між обома діапазонами дуже чіткий при 10-20% UKCi, але згладжується при від'ємних значеннях UKCi. Цей ефект викликаний не

підвищеним опором, а скоріше перешкодою потоку до гребного гвинта через внутрішні хвилі. Глибше проникнення в шари мулу, однак, призводить до значного збільшення опору.

Промодельовані кола повороту свідчать, що здатність судна до повороту зменшується, коли присутній шар рідкого мулу. Тактичний діаметр досягає максимуму при дуже малому позитивному значенні UKC_i , але зменшується, як тільки киль проникає в шар мулу, а в шарах мулу високої щільності навіть стає меншим, ніж над твердим дном (рис. 2.10).



а)



б)

Рисунок 2.10 – Тактичний діаметр а) та кут для зигзага 20/20 б) для моделі контейнеровоза: вплив характеристик дна та UKC_i
(Джерело – розроблено автором)

Кути знесення під час маневрів на поворотах дуже малі над мулом і в мулі. Стосовно зигзагоподібних тестів, то перший кут приймає набагато менші значення над і в шарах мулу порівняно з умовами твердого дна, див. рис. 2.9.

У деяких портах впровадження концепції морського дна призвело до навігації зі зменшеним УКСі; у випадку мулових шарів значної товщини, навіть навігація через муловий шар є звичайною практикою. У деяких портах безпечною межею вважається максимальне занурення в мулистий шар на глибину 7% осадки. Ще більша глибина занурення застосовується в портах, де мул постійно перебуває в псевдозрідженому стані.

Однак судноводії повинні враховувати змінену поведінку судна, наприклад, передбачаючи підвищену інерцію, суворі обмеження швидкості і достатність допомоги буксира. Необхідно знати не тільки рівень морського дна, але й положення межі розділу фаз. Загалом, невелике від'ємне значення УКСі призводить до більш стабільної та передбачуваної поведінки порівняно з невеликим додатним значенням УКС. Однак контакт з консолідованими шарами мулу може призвести до неконтрольованої швидкості і курсу, і його слід уникати.

2.5 Розроблення моделі розходження суден у стиснутих водах

Однією з проблем, що заважають безпечному маневруванню у стиснутих водах, є гідродинамічна взаємодія між суднами.

У межах розроблення відповідної моделі для системи підтримки прийняття рішень буде розглянуто такі типи взаємодії:

– взаємодія між суднами, що рухаються паралельними курсами: під час обгону судна рухаються в одному напрямку, при цьому відбувається зіткнення (зустріч, взаємне або лобове зіткнення) з суднами, що пливають у протилежних напрямках;

- взаємодія з пришвартованим судном;
- взаємодія між суднами, що рухаються з приблизно однаковою швидкістю паралельно і в безпосередній близькості один від одного;
- взаємодія між суднами, що рухаються паралельно і в безпосередній близькості один від одного, яка відбувається під час маневрів лавірування та під час маневрів у порту для поповнення запасів (UNREP);
- взаємодія буксирів з суднами.

2.5.1 Модель суден, що рухаються паралельними курсами у стиснутих водах

У загальному випадку ефекти взаємодії (рис. 2.11) починають відчуватися, коли носові частини обох суден відштовхуються одна від одної, що супроводжується невеликим збільшенням швидкості. Коли судна проходять повз, момент рискання на носі змінюється на момент рискання на борту, і відштовхування зменшується. Потім момент диферента повертається під час проходження, але тепер він сильніший і може призвести до того, що судна будуть віддалятися одне від одного, коли вони пройдуть повз. Також може відчуватися зниження швидкості. Нарешті, слабкий момент нахилу, що супроводжується відштовхуванням, може відчуватися [35].

Аналогічно, різний розподіл тиску навколо судна впливає на занурення й диферент обох суден. З точки зору взаємодії, перехід на взаємні курси має перевагу, оскільки відбувається швидко, так що судно часто не встигає відреагувати на різні сили та моменти взаємодії, які він відчуває.

Зазвичай, домінуючими ефектами є моменти розвороту, коли судна починають проходити повз один одного, і мають сильніші моменти крену, коли розходження майже закінчилося.

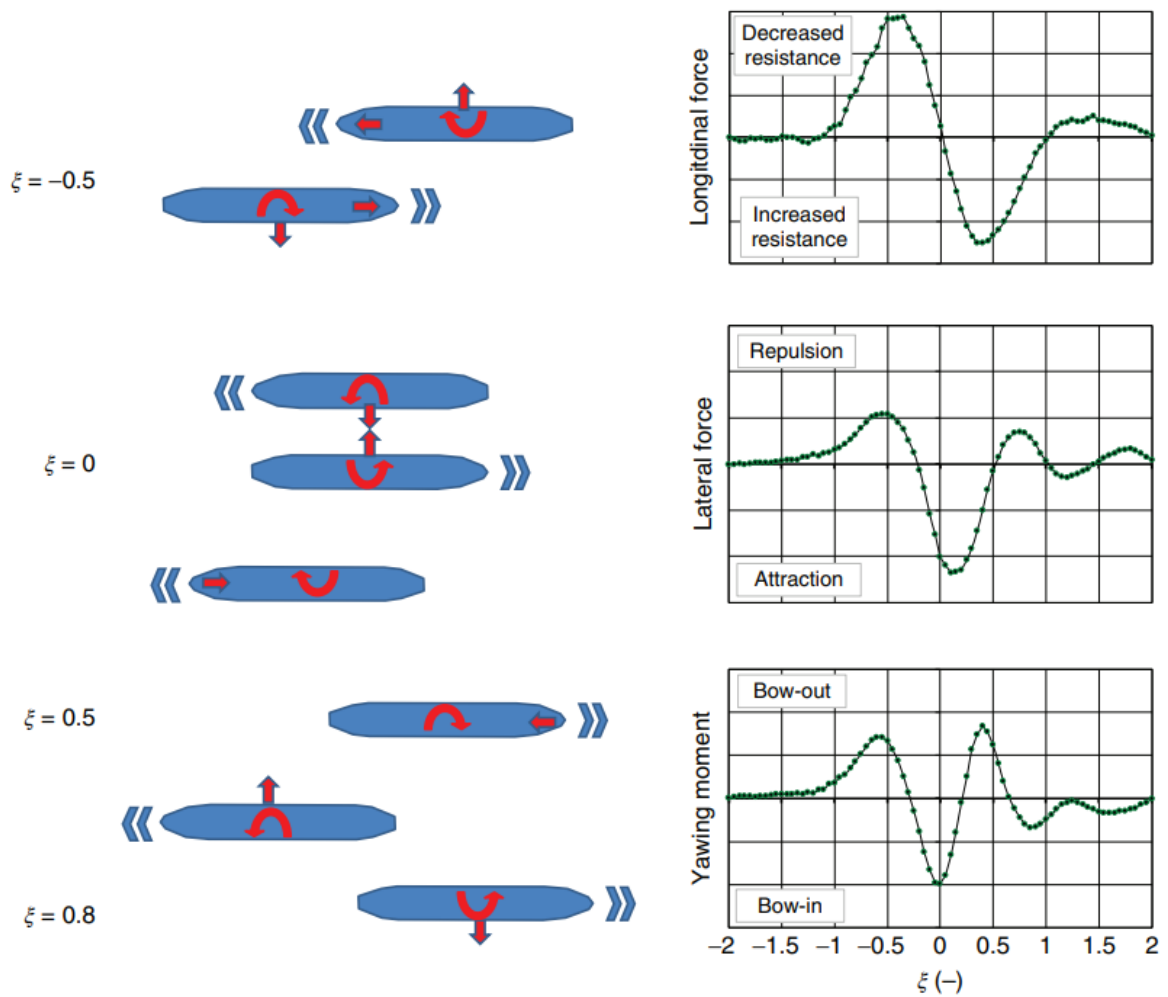


Рисунок 2.11 – Моделювання ефектів горизонтальної взаємодії під час маневрів зіткнення, ξ – безрозмірне позначення для поздовжньої відстані між обома секціями міделів
(Джерело – розроблено автором)

2.5.2 Модель обгону суден у стиснутих водах

Типові сили такої взаємодії для обох суден наведені на рис. 2.12. Оскільки судно, що обганяє, виконує обгін іншого судна, момент нахилу спочатку відчуває найшвидше судно. Судно, яке наздоганяє, відчує сильний момент розвороту, за яким слідує момент зближення. Сила хитавиці на судні, яке наздоганяють, характеризується послідовністю відштовхування, притягування та відштовхування, що можна порівняти з маневрами зустрічного розвороту.

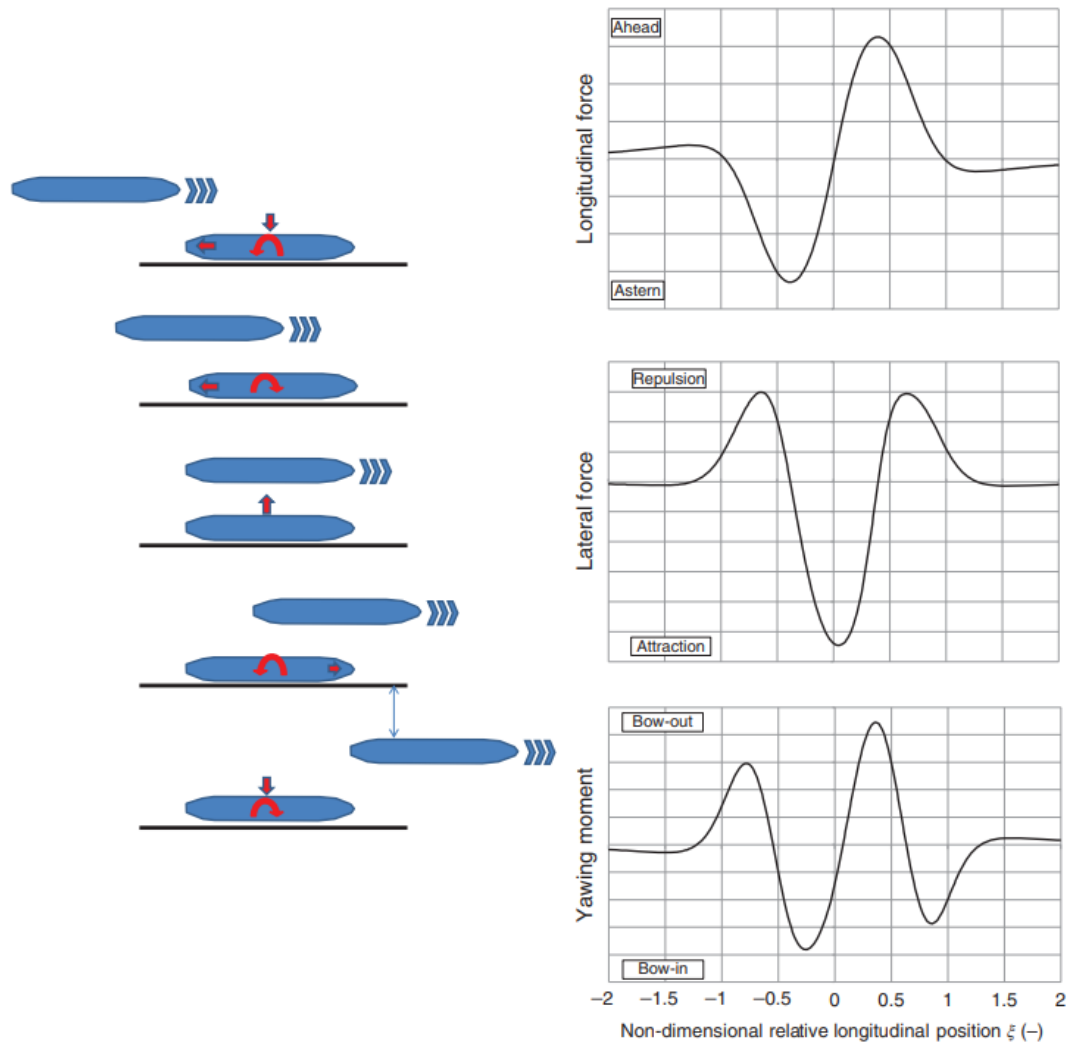


Рисунок 2.12 – Моделювання ефектів горизонтальної взаємодії під час типового маневру обгону
(Джерело – розроблено автором)

Спочатку судно, яке наздоганяє, відчуває збільшення опору. Але коли воно опиняється перед судном, яке збирається обігнати, зменшення опору викликає прискорення судна. Тоді як судно, яке наздоганяє, сповільнюється, що робить процедуру обгону більш складною. Оскільки відносна швидкість під час обгону може бути низькою, взаємодія встигає вступити в силу. Сценарій зіткнення показаний на рис. 2.13 а) й виникає, коли судно, яке обганяють, розвертається впоперек носа судна, що обганяє, яке може бути повернуте до нього під деяким кутом.

Якщо зіткнення не відбудеться і судно, що наздоганяє, пройде повз

інше, обидва судна відчують потужні моменти на носі разом із взаємним притягуванням. Це може призвести до того, що обидва судна “розлетяться” та їх корми зіткнуться, як показано на рис. 2.13 б).

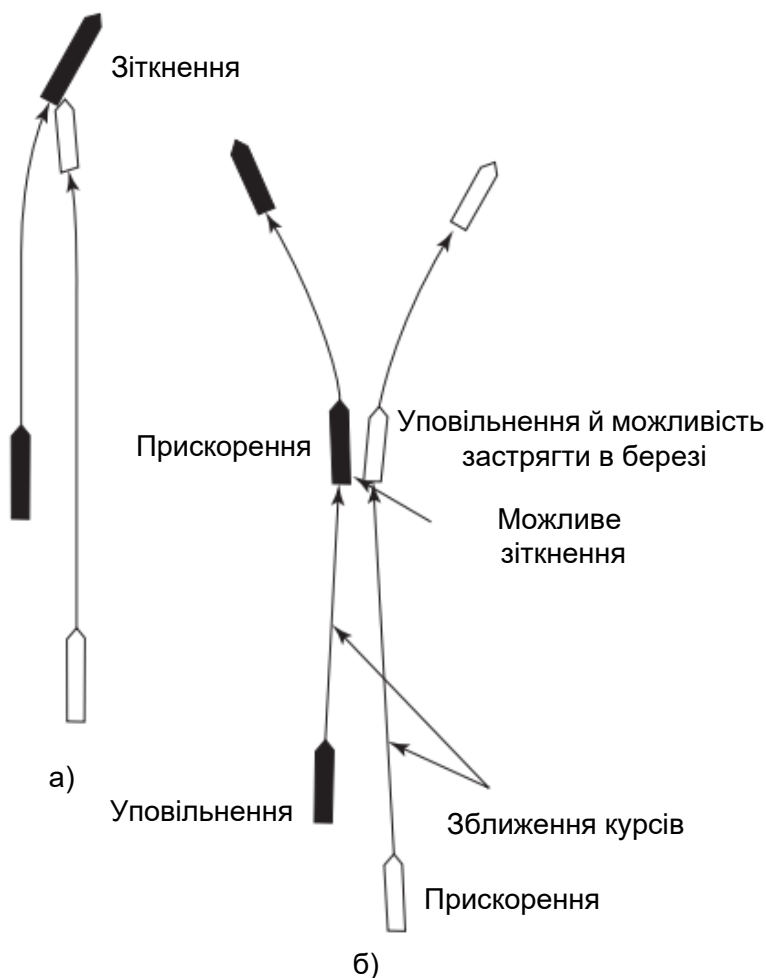


Рисунок 2.13 – Моделювання можливих ситуацій зіткнення під час виконання маневру обгону
(Джерело – розроблено автором)

Дані особливості обгону повинні бути враховані при побудові знання орієнтованих моделей системи підтримки прийняття рішень маневрування у стиснутих водах.

2.5.3 Модель взаємодії з пришвартованими суднами

Судна, пришвартовані у стиснутих водах, зазнають впливу гідродинамічних сил через вплив інших суден, що проходять поруч, (рис. 2.14), а також вертикальних рухів.

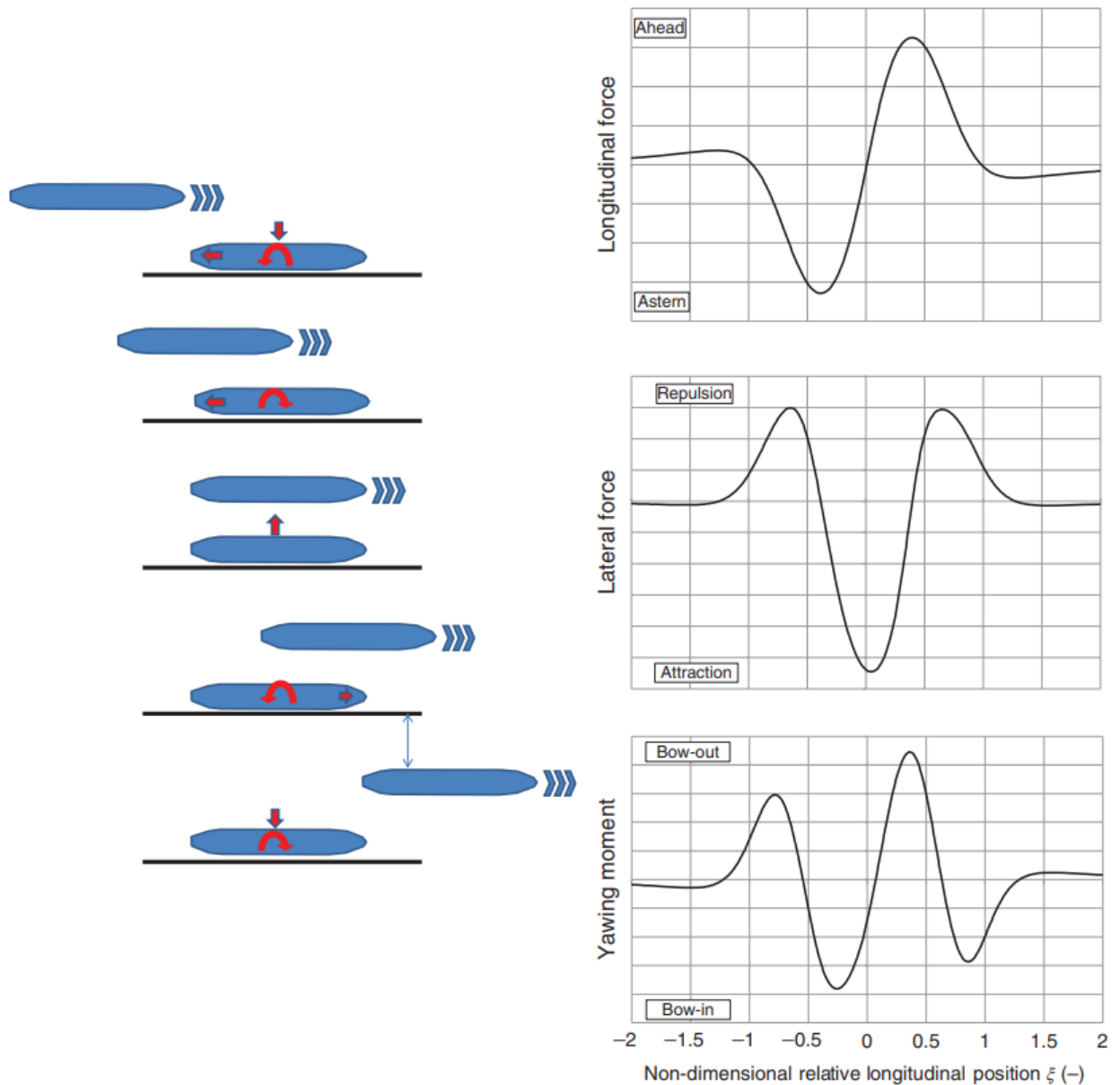


Рисунок 2.14 – Моделювання сил взаємодії на пришвартованому судні через судно, що проходить повз нього
(Джерело – розроблено автором)

Судно, що проходить повз, спричиняє на пришвартоване судно вплив,

пов'язаний з низькочастотними первинними системами тиску, та сили, які пов'язані з більш високочастотною вторинною системою тиску. Низькочастотні (втягуючі) сили є більш значущими для пришвартованого судна на низьких швидкостях, тоді як наведені хвилі стають важливими на швидкостях, близькими до критичних або надкритичних [36].

Сили взаємодії викликають рухи пришвартованого судна, які можуть перешкоджати розвантаженню/навантаженню судна у стиснутих водах або спричинити пошкодження швартовної системи.

Незважаючи на те, що сила качки більша за силу хвилі, остання часто спричиняє високе навантаження на швартовні лінії через нижчий рівень демпфування хвилі. Впливи, які судна, що проходять повз, спричиняють пришвартованим суднам, часто можна зменшити, приділяючи увагу порядку швартування суден.

Альтернативними заходами є зменшення швидкості суден (що не завжди можливо, оскільки для збереження маневреності може знадобитися мінімальна швидкість), збільшення дистанції між суднами або поглиблення каналу і причалу.

Оскільки розміри і швидкості суден з роками збільшуються, зростають й сили взаємодії. Цілком логічно, що сили взаємодії на пришвартоване судно збільшуються зі зменшенням бічної прохідної відстані та УКС, а також зі збільшенням розміру і швидкості судна, що проходить повз [37]. Експерименти [37] свідчать, що сили на пришвартоване судно від судна, що проходить повз, пропорційні квадрату швидкості судна, що проходить, за умови відносно низьких швидкостей. Сили можуть бути значно більшими для більших чисел Фруда, оскільки сили значно відхиляються від припущення про квадратичний закон приблизно для глибинних чисел Фруда $Fr_h > 0,25$ [36].

2.5.4 Модель поповнення запасів на суднах у стиснутих водах

Дана операція зазвичай визначається як операція з поповнення, в якій зазвичай беруть участь два судна, що значно відрізняються за розміром. Велике судно називається судном, що підлягає обслуговуванню (STBL), тоді як менше судно називається обслуговуючим судном.

Операція може проводитися в стиснутих водах. Під час операцій, що проводяться у стиснутих водах, обидва судна здебільшого стоять на якорі та пришвартовані разом, ця ситуація не обговорюється; увага приділяється операціям з поповнення, в яких беруть участь два судна, що рухаються паралельно поряд на малих швидкостях руху вперед. Ситуація схожа на операцію поповнення в морі, або операції UNREP, що виконується військовими кораблями. Вимоги до маневрування обслуговуючого судна змінюються за проходженням різних етапів. Зазвичай обслуговуюче судно починає свій підхід ззаду, з правого борту STBL. Для того, щоб виконати операцію з поповнення судно повинно відповідати швидкості та курсу STBL, а поперечна й поздовжня відстань відносно цього судна повинна безперервно контролюватися.

Після того, як згадані вимоги виконані, обидва судна, що рухаються вперед, пришвартовуються разом, використовуючи крила, які забезпечують бокове розмежування до 5 м в діаметрі [38]. Потенційно небезпечні ситуації зіткнення можуть виникнути через наявність гідродинамічної взаємодії між вантажами, коли два судна працюють у безпосередній близькості.

Сили взаємодії залежать від швидкості, бічного відриву та відносного поздовжнього положення, як наведено на рис. 2.15.

2.5.5 Модель взаємодії буксира з судном

Виконуючи завдання буксирування, буксири повинні наближатися до суден, яким вони надають допомогу, іноді на відносно високих швидкостях, що означає, що сили взаємодії можуть бути також високими. Для уникнення нещасних випадків, розуміння взаємодії між суднами і буксирами є важливим для судноводіїв та міститися у вигляді окремих модулів системи підтримки прийняття рішення судноводіння у стиснутих водах та мілководді.

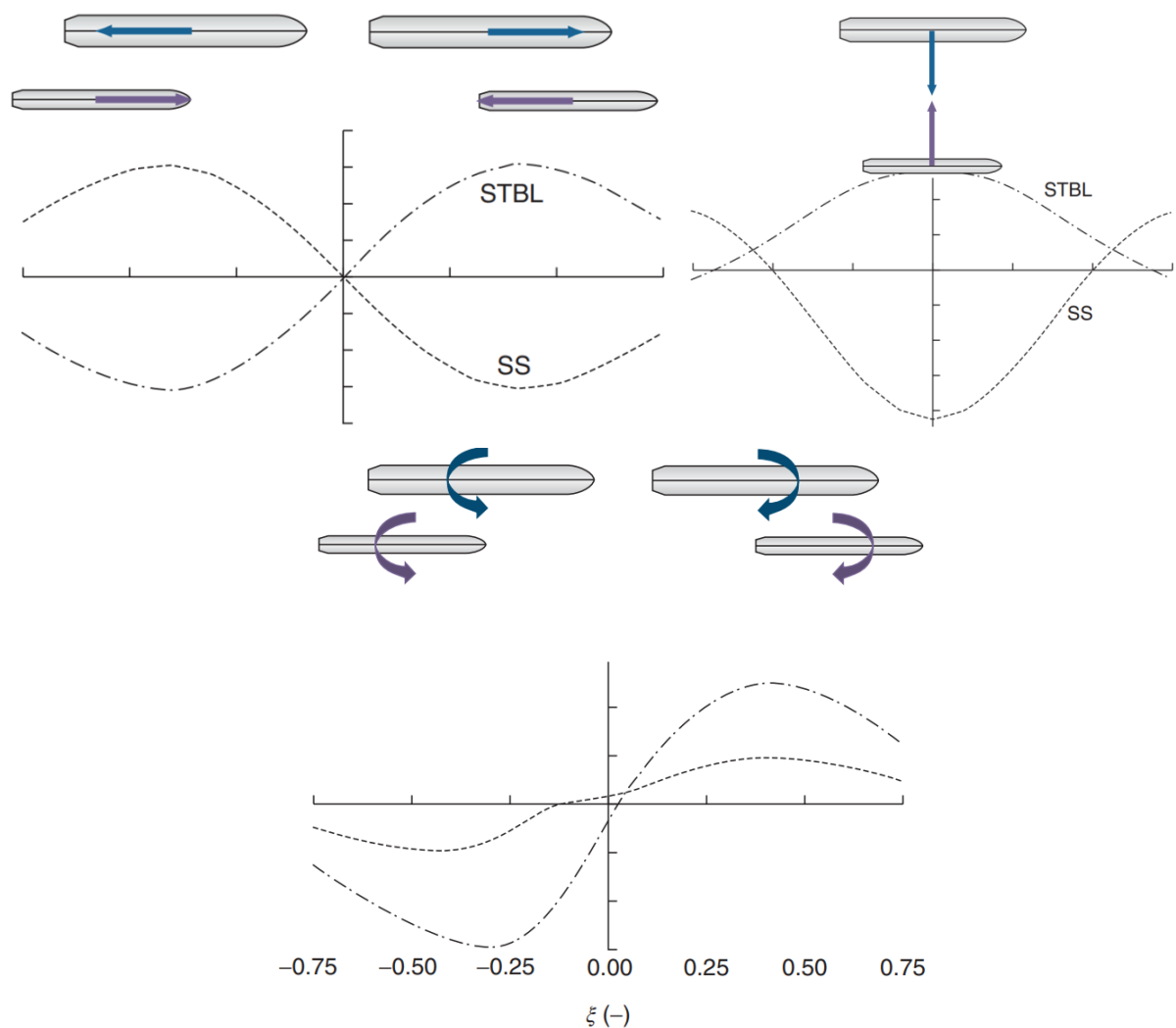


Рисунок 2.15 – Сили взаємодії під час маневру поповнення як функція відносного поздовжнього положення обох суден поздовжня сила (вгорі), поперечна сила (посередині) і момент ристання (внизу)

(Джерело – [39])

Буксир, як правило, набагато менший за судно, якому він надає допомогу, і в той час як певна глибина води може бути великою для буксира, вона може бути мілкою для судна. Це означає, що судно матиме значний інтерактивний вплив на буксир, а буксир не матиме практично ніякого впливу на судно. Зокрема, через асиметрію течії виникатимуть сила качки, хвильова сила та момент рискання. Як завжди, ці сили взаємодії посилюються, якщо потік стає більш двовимірним. На рис. 2.16 наведено, які сили взаємодії та моменти зазвичай відчувають буксири з традиційною силовою установкою (і керованим рушієм), коли вони наближаються до судна.

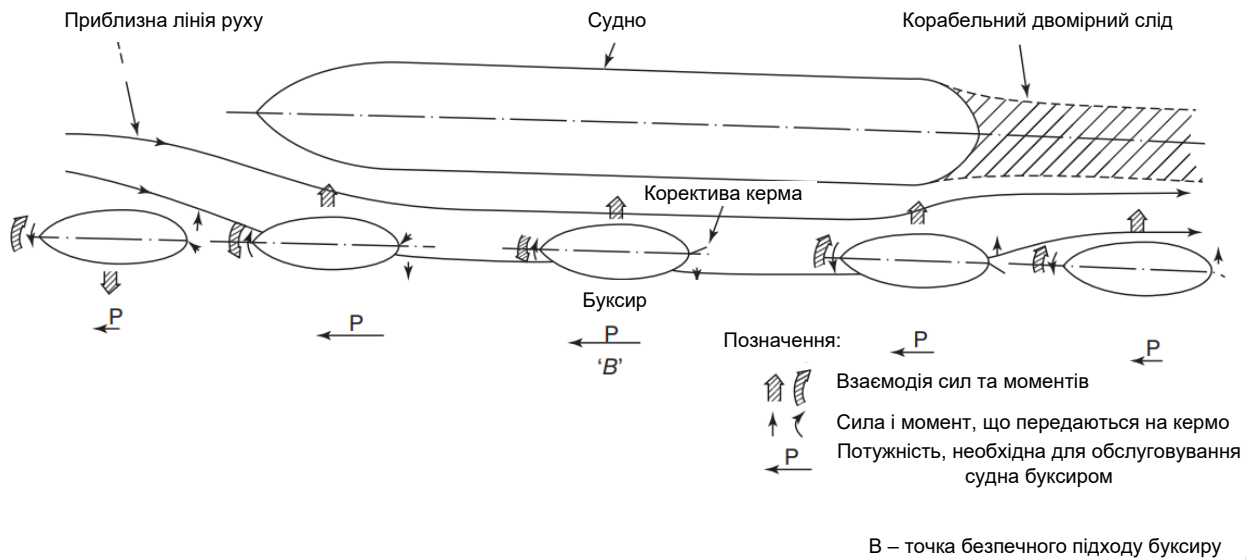


Рисунок 2.16 – Сили взаємодії «буксир»-«судно»

(Джерело – розроблено автором)

Коли буксир знаходиться біля корми судна, його швидкість може збільшитися через швидкість течії з корми судна. У безпосередній близькості до корпусу судна низький тиск починає рухати буксир у напрямку судна.

Для суден у баластному стані або суден з особливо нависаючою кормою буксир ризикує пошкодити корпус або надбудову судна. Просуваючись вперед та поблизу корпусу судна, буксир відчуває значну силу притягування у напрямку корпусу судна та момент рискання на носі судна.

Коли буксир притягується судном, йому, як правило, важко відновити свій курс. Коли буксир просувається далі вперед біля носової частини судна, він потрапляє в зону високого тиску, і момент рискання на носі судна зростає, що має бути компенсовано відповідним використанням керма і гребного гвинта. Нарешті, коли буксир знаходиться біля носа, сильна сила качки, що діє на корму, тягне буксир вперед й під ніс з ризиком перекидання.

Буксир може безпечно наближатися до середніх суден, де сила поздовжньої взаємодії допомагає утримати судно на місці. Деякі зони біля носа і корми краще уникати, оскільки контроль, який здійснює кермо, збільшує, а не зменшує ефекти взаємодії.

Висновки до розділу 2

1. Судноводіння на мілководді є звичайною практикою у стиснутих водах (наприклад, в портах та на підходах до них). У таких навігаційних зонах, які характеризуються обмеженою глибиною та шириною, морські судна часто стикаються з абсолютно іншими умовами плавання порівняно з навігацією у відкритому морі. Більшість суден спроектовані та оптимізовані саме для навігації у відкритому морі.

2. Визначено, що курсова стійкість та маневреність судна значно змінюються залежно від наявного коефіцієнта диференту особливо в природних водних шляхах (річки, естуарії), де глибина води може значно змінюватися як за довжиною каналу, так і протягом припливно-відпливного циклу, а маневрені характеристики судна можуть зазнавати значних змін під час проходження каналу.

3. Удосконалено модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка, на відміну від існуючих, враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

4. Отримала подальший розвиток модель розходження суден у стиснених водах, яка, на відміну від існуючих, враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є елементом системи підтримки прийняття рішень судноводіння та дозволяє підвищити безпеку судноводіння.

Основні результати, отримані у розділі 2, опубліковані у роботах здобувача [71, 78, 79].

РОЗДІЛ 3

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МАНЕВРУВАННЯМ СУДНА У СТИСНУТИХ ВОДАХ

У даному розділі дисертаційної роботи виконана структурна ідентифікація динамічної системи управління судном, визначено кореляційні залежності між вхідними та вихідними параметрами такої системи. Виконано параметричну ідентифікацію лінійних та нелінійних моделей руху судна, здійснено порівняльний аналіз якості ідентифікації. Визначено, що час, який витрачається на адаптацію такої моделі, а також необхідність мати весь часовий ряд виміряних параметрів руху судна під час виконання маневру вимагає застосування комп'ютера з достатньо високою продуктивністю у САУ судна під час здійснення ним маневрування на мілководді.

Основним результатом, отриманим у розділі, є удосконалений адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном в стиснутих водах та на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

3.1 Зміст ідентифікації моделі управління маневруванням судна

Під ідентифікацією систем при маневруванні судна у стиснутих водах та на мілководді слід розуміти сукупність методів для побудови математичних динамічних моделей систем за даними спостережень. Тому, завдання ідентифікації в загальній постановці формулюється так: щодо реалізації вхідних та вихідних сигналів необхідно визначити оператор, який відображає структуру та параметри (руху судна) об'єкта ідентифікації, що встановлює математичний зв'язок між входами та виходами динамічної системи.

У процесі синтезу системи управління рідко є повна апріорна інформація про об'єкт та навколишнє середовище. У разі, якщо системи рівнянь, що описують поведінку системи, відомі, виникають складності у визначенні величин окремих параметрів, що у процесі отримання адекватних моделей, необхідно попередньо або у процесі управління ідентифікувати.

Аналіз методів ідентифікації свідчить, що для різних типів подання математичних моделей процесу використовуються різні методи, що працюють найкращим чином (рис. 3.1) [40, 41].

Для вибору методів ідентифікації процесів управління незалежно від способу управління, судно пропонується розглядати як динамічну систему.

Динамічна система – це система, стан якої змінюється з часом під впливом деяких зовнішніх та/або внутрішніх сил (чинників).

У подальшому дослідженні, згідно наведеної класифікації математична модель зміни кутової швидкості судна на повороті може бути представлена такими типовими характеристиками:

- 1) за кількістю управляючих впливів – одновимірний;
- 2) за характером проведення експерименту – пасивний;
- 3) за виглядом оброблюваних сигналів – дискретний;
- 4) за зміною параметрів у часі – детермінований, нестационарний;
- 5) за можливістю обчислення елементів – розподілений у часі.

Математичною моделлю системи автоматичного управління (САУ) називають пару «оператор системи» – «модель зовнішніх впливів» [20, 42]. Оператором системи називають закон, яким система управління перетворює вхідний (зовнішній) вплив (u) у вихідний сигнал (y).

Судно як динамічна система піддається різним вхідним впливам, пов'язаним (керованим) і не пов'язаним (зовнішні збурення – некеровані) з метою управління. Збурювальні впливи складаються з вимірюваних та невимірюваних змінних (швидкість та напрямок вітру, течії, сили та періоди хвилювання), визначити ступінь їх впливу на вихідні параметри в реальному часі з достатньою точністю не завжди є можливим.

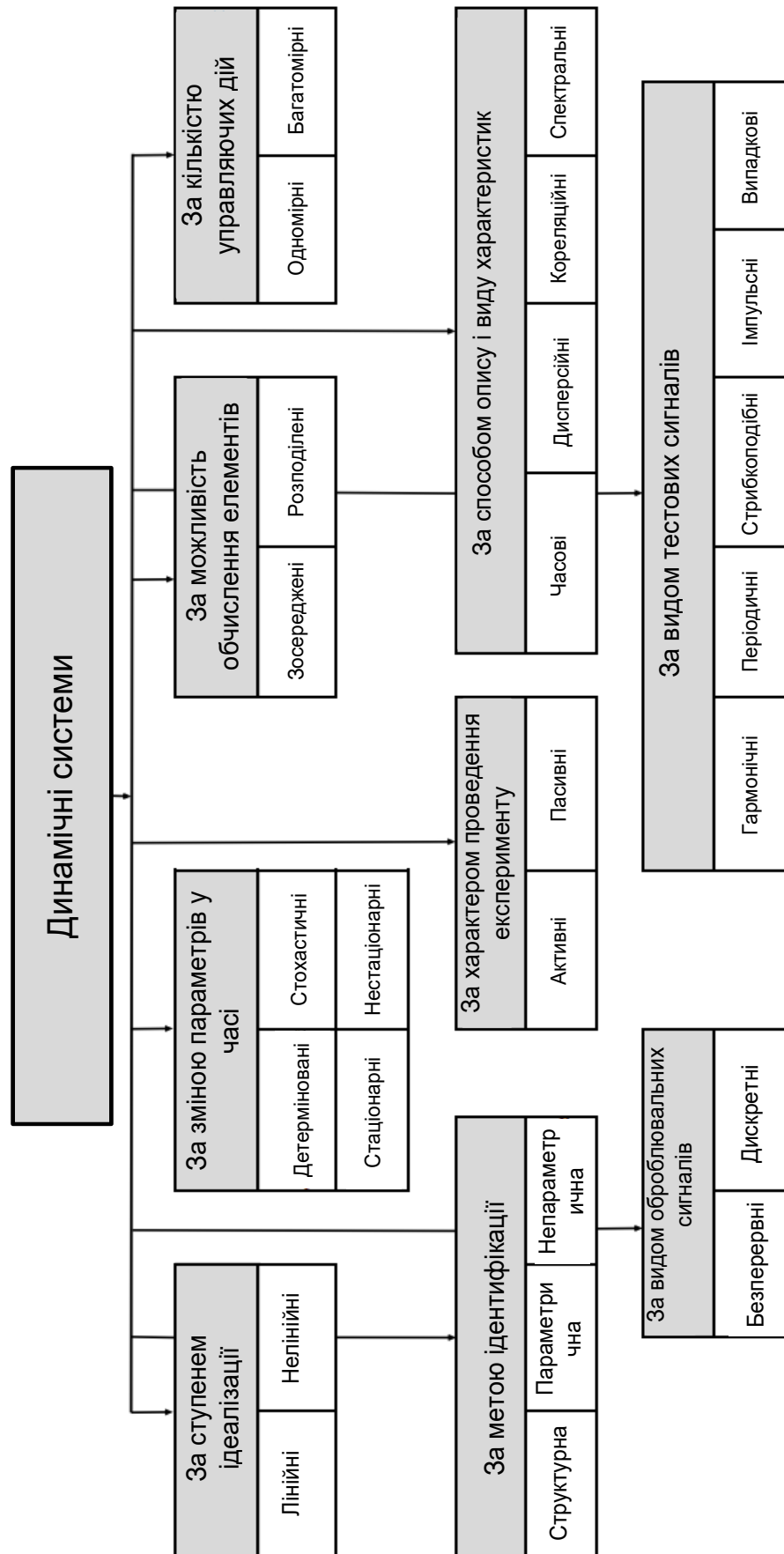


Рисунок 3.1 – Класифікація методів ідентифікації динамічних систем
(Джерело – розроблено автором)

У різних дослідженнях дані зовнішні дії сприймаються як білий шум, найчастіше гаусівський, тобто випадковий процес з нульовим математичним сподіванням та дельтоподібною кореляційною матрицею [43]. Тим часом реальні збурюючі впливи є кольоровими, корельованими шумами [44].

Тому у подальшому будь-які зовнішні збурюючі впливи на динамічну систему, не пов'язані, з метою управління приймаються за шум $Z(t)$.

На практиці вимірювання безперервних сигналів здійснюється, як правило, в дискретні моменти часу у вигляді часових рядів, що найбільш зручно при подальшій обробці даних на ЕОМ, побудові та ідентифікації математичних моделей та їх подальшому використанні у САУ на борту судна.

Для ідентифікації системи на підставі отриманих експериментальних даних, відповідно до методики [45], необхідно (рис. 3.2):

- 1) зробити структурну ідентифікацію динамічної системи;
- 2) виконати поділ вибірки експериментальних даних на навчальний та верифікаційний набір даних;
- 3) зробити вибір та побудову моделі;
- 4) оцінити якість моделювання на основні верифікаційних даних.

Відповідно до досліджень [46, 47], проблему ідентифікації розрізняють у сенсі – структурної ідентифікації, що передбачає формування виду математичного описи, та ідентифікації у вузькому сенсі – параметричної ідентифікації, тобто визначення коефіцієнтів рівнянь математичної моделі.

3.2 Структурна ідентифікація моделі управління маневруванням судна у стиснутих водах та на мілководді

Структурна ідентифікація динамічної системи складається з [46, 47]:

- 1) виділення її з навколишнього та взаємодіючого середовища;
- 2) визначення залежностей між входами та виходами динамічної системи за рівнем їх впливу на поведінку об'єкта;

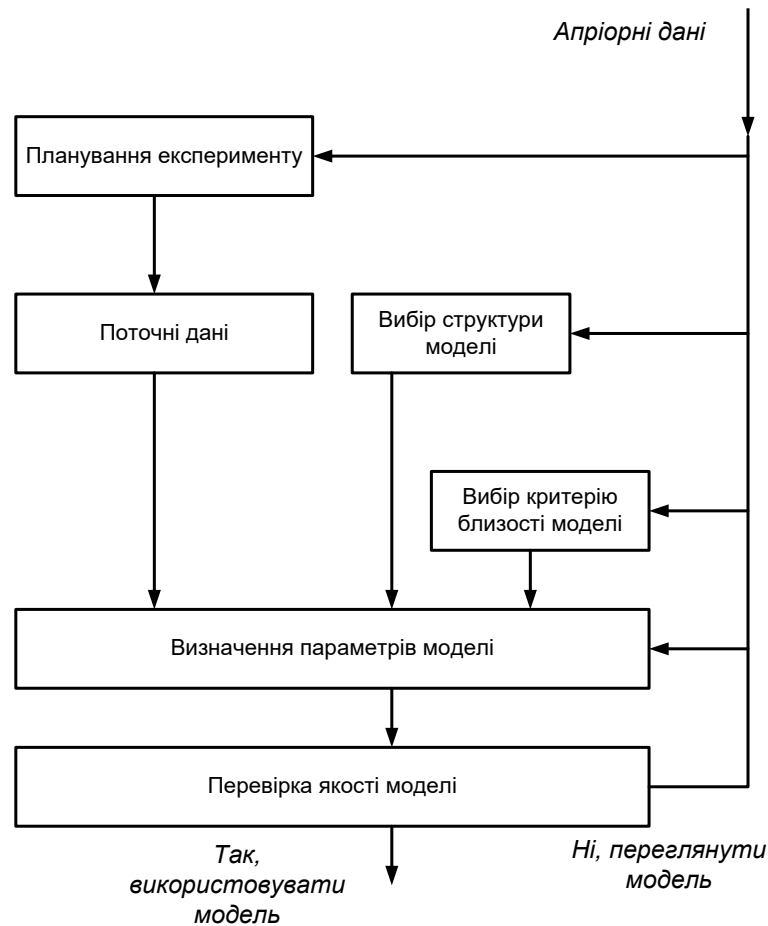


Рисунок 3.2 – Загальна схема ідентифікації моделі
(Джерело – розроблено автором)

3) визначення оптимальної кількості входів та виходів об'єкта, що враховуються в моделі;

4) визначення якості взаємозв'язків між входами та виходами моделі динамічної системи.

При дослідженні керованості математичний опис руху судна ведеться, як правило, у рухомій, пов'язаній з судном, системі координат B , оскільки при цьому значення приєднаних мас та моментів інерції води не залежать від параметрів руху судна. ЦВ судна пов'язує вектор швидкості та його компоненти (істинний курс, кут дрейфу, лінійну та кутову швидкості).

Датчики вимірювання різних координат (антена GNSS, курсовказувач, лаг тощо) рознесені по корпусу судна та при русі судна по криволінійній траєкторії, загалом, переміщуються з різними лінійними швидкостями та

радіусом кривизни. Усі вимірювані та оцінювані кінематичні характеристики руху судна завжди можуть бути приведені до будь-якої однієї точки (ЦВ судна) з використанням формули Рівальса [48].

Параметри руху судна в системі координат B визначаються так:

$$\begin{aligned} V_x &= V \cdot \cos\beta; \\ V_y &= -V \cdot \sin\beta. \end{aligned} \quad (3.1)$$

До виконання процедур ідентифікації пропонується спочатку визначити ступінь залежності між вхідними та вихідними параметрами руху судна. В теорії ймовірності залежність між двома величинами характеризується кореляцією та виражається через коефіцієнт кореляції, який набуває значення від -1 до +1 [43]. Чим вище значення коефіцієнта кореляції, тим більше взаємодія між параметрами, якщо значення коефіцієнта кореляції дорівнює 0, то між даними параметрами взаємний вплив відсутній. Якісне значення ступеня кореляції оцінюється відповідно до даних таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Якісні значення коефіцієнтів кореляції
(Джерело – розроблено автором)

Значення (за модулем)	Якісне значення
0	зв'язок відсутній
до 0,2	дуже слабкий
до 0,5	слабкий
до 0,7	середній
до 0,9	високий
більше 0,9	дуже високий

Визначення коефіцієнтів кореляції здійснюється з використанням деяких виміряних та обчислених вхідних й вихідних параметрів судна водотоннажністю 630 тонн, довжиною 62,5 м, з інтервалом 1 с. Для визначення залежності вихідних від вхідних параметрів використовувався маневр зміни курсу на 30°.

Для обчислення коефіцієнтів кореляції використовується метод квадратів (Пірсона) [43].

Кількісні результати взаємозв'язків вихідних від вхідних параметрів за допомогою критерію Пірсона наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Залежність вихідних параметрів руху судна від керуючих величин (положення пера керма – δ , частота обертання гвинта – n)
(Джерело – розроблено автором)

Параметр руху судна	Коефіцієнт кореляції		Кількісне значення	
	δ	n	δ	n
β	[0,4405]	[0,3451]	слабка	слабка
V_x	[0,6565]	[0,7342]	середня	висока
V_y	[0,7150]	[0,3032]	висока	слабка
ω	[0,9379]	[0,2307]	дуже висока	слабка

На підставі певних кількісних залежностей можна зробити висновок, що головною керованою величиною судна при здійсненні поворотів є кутова швидкість. Закінченням повороту вважається момент, коли значення вихідного параметра (кутова швидкість) та вхідного параметра (положення пера руля) набуває нульового значення. Причому певні значення відносяться лише до вказаного маневру даного судна. При виконанні інших маневрів і маневруванні інших суден залежності можуть набувати відмінних значень.

Таким чином, для побудови САУ, що забезпечує високоточні повороти шляхом зміни величини та знаку кутової швидкості судна за допомогою кута перекидки керма, пропонується здійснити побудову та ідентифікацію моделі зміни кутової швидкості судна на повороті. З огляду на різноманітність моделей та методів (див. рис. 3.1) процедури ідентифікації пропонується проводити поетапно. На початковому етапі пропонується ідентифікувати лінійні та нелінійні моделі руху судна для окремих режимів маневрування. При цьому, враховуючи наявність у сучасних системах судноводіння засобів зберігання інформації у вигляді часових рядів, можуть застосовуватися регресійні методи та моделі, в тому числі, для динамічних моделей. Після

первинної ідентифікації у процесі експлуатації може виконуватися адаптивна перебудова моделей спеціальними методами [41].

За прийнятими правилами побудову процесів управління і моделей руху під реальні умови плавання та маневрування пропонується здійснювати за спеціально синтезованими алгоритмами шляхом внесення відповідних поправок до параметрів цих моделей і процесів [15, 21]. Експериментальні дані для початкової процедури ідентифікації були отримані в ході довільного маневрування судна водотоннажністю 630 тон, завдовжки 62,5 м на спокійній воді. На рис. 3.3 позначено: y_1 (вихідний параметр) – кутова швидкість; u_1 (вхідний параметр) – положення пера керма. Для контролю якості ідентифікації вибірка експериментальних даних поділена на дві рівні частини – для навчання та перевірки якості (верифікації) отриманого алгоритму. Будь-які вимоги до цього поділу набору даних відсутні.

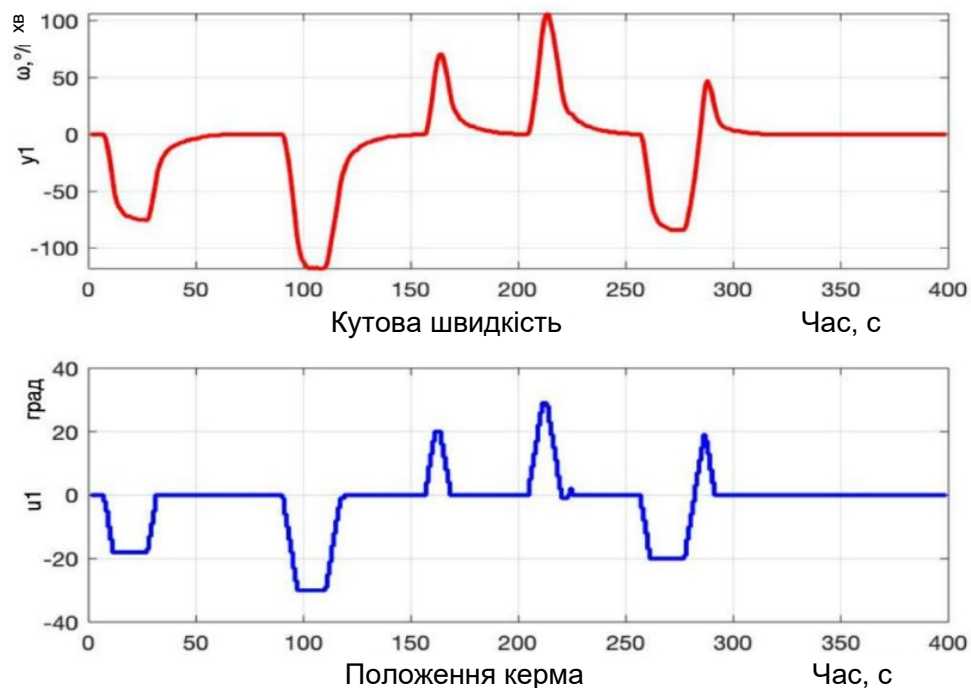


Рисунок 3.3 – Експериментальні дані маневрування судна
(Джерело – розроблено автором)

З графіків, наведених на рис. 3.4, видно, що вихідні сигнали системи на обраних ділянках відрізняються один від одного, що дозволяє стверджувати

про об'єктивність перевірки якості ідентифікації моделі при її прогонці у порівняння з верифікаційними даними.

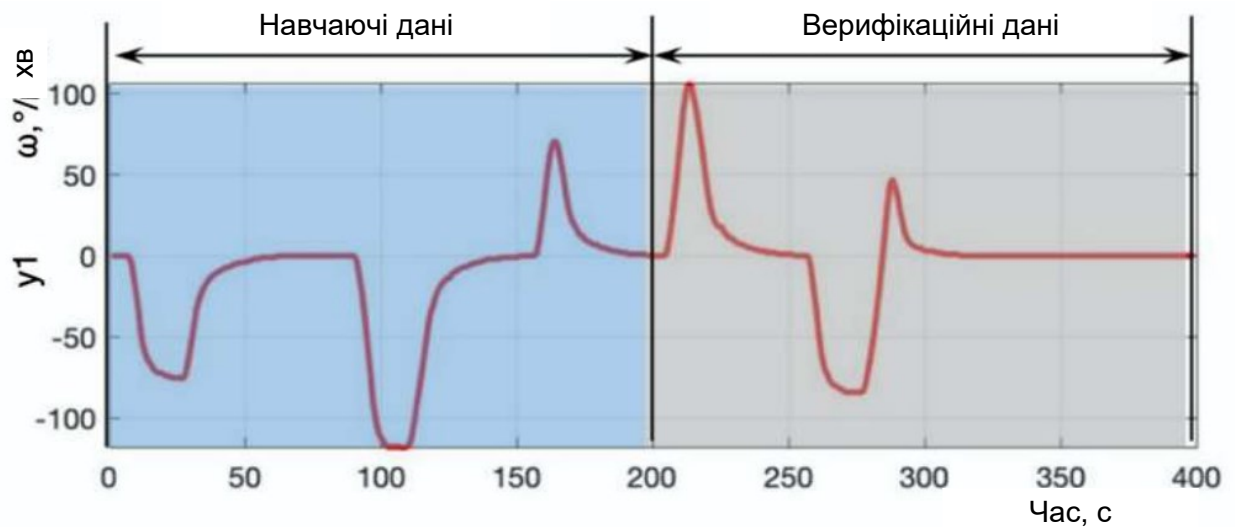


Рисунок 3.4 – Розподіл експериментальних параметрів на навчальні та верифікаційні набори даних
(Джерело – розроблено автором)

Підбір порядку моделі

Нехай na – кількість минулих вихідних умов; nb – кількість минулих вхідних умов, що використовуються для прогнозування поточного виходу; nk – вхідна затримка. Основним кроком у побудові моделей типу “вхід-вихід” є вибір порядків моделей, який зазвичай вибирається методом спроб і помилок [20]. Зі збільшенням порядку покращується адекватність моделі, але підвищується складність моделі та час моделювання. У зв'язку з чим виникає завдання необхідності визначення її оптимального порядку [20].

Якщо порядок моделі відповідає порядку об'єкта, то параметричні моделі характеризуються великими похибками. Для вибору оптимальних порядків моделі використовується інформаційний критерій Акаїки (ІКА), заснований на припущенні, що дані мають нормальний імовірнісний розподіл [20, 26]. Згідно ІКА, необхідно вибирати модель, яка мінімізує функціонал:

$$AIC = -2\log L(X^l) + 2d, \quad (3.2)$$

де $L(X^l)$ – правдоподібність вибірки в межах даної моделі; d – кількість параметрів моделі.

Критерій ІКА представляє асимптотично незміщену оцінку очікуваної відносної інформації – відстань Кульбака-Лейблера (KL), яка визначає кількість втраченої інформації при порівнянні фактичних та змодельованих даних системи. В результаті ІКА вибирає модель-кандидата із найменшою відстанню KL. Збільшення кількості параметрів запобігає перенавчанню, коли перший член стає менше, а другий, штрафний, член – більше.

Процедури визначення порядку моделі руху судна за допомогою АІС (3.2) здійснювалися у програмному середовищі MATLAB. У результаті розрахунку та аналізу отриманих результатів, а саме, кількості вхідних регресорів моделі кутової швидкості руху судна – 2, вихідних регресорів – 4, часу затримки 1 крок, наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порядок моделі, яка ідентифікується
(Джерело – розроблено автором)

Регресори	Модель кутової швидкості судна
Вихідні регресори	$y_1(t-1), y_1(t-2), y_1(t-3), y_1(t-4),$
Вхідні регресори	$u_1(t-1), u_1(t-2)$

3.3 Параметрична ідентифікація моделі управління маневруванням судна у стиснутих водах та на мілководді

Параметрична ідентифікація є ідентифікацією у вузькому значенні, яка полягає в оцінюванні параметрів та стану системи за результатами спостережень за вхідними та вихідними змінними, отриманими в результаті

функціонування об'єкта.

Для опису руху судна на користь судноводіння розглядається нерухома прямокутна система координат $O\xi\eta$, пов'язана із Землею (система координат А), і рухома прямокутна система координат Oxy , пов'язана із центром тяжкості судна (система координат В).

На основі різних фундаментальних досліджень [18, 19, 34, 35] рівняння вихідної моделі взаємопов'язаних швидкостей горизонтального руху судна у пов'язаній системі прямокутних координат пропонується подати у такому нелінійному вигляді:

$$\begin{aligned}(m + \lambda_1) \frac{dV_x}{dt} - (m + \lambda_2)V_y\omega &= F_x, \\ (m + \lambda_2) \frac{dV_y}{dt} - (m + \lambda_1)V_x\omega &= F_y, \\ (I_z + \lambda_3) \frac{d\omega}{dt} - (\lambda_1 - \lambda_2)V_xV_y &= M_z,\end{aligned}\tag{3.3}$$

де m, λ_i – маса судна та приєднана до судна маса води; V_x, V_y, ω – проекції лінійної швидкості руху судна на осі координат та кутова швидкість повороту судна навколо вертикальної осі; I_z – момент інерції судна; F_x, F_y, M_z – проекції сумарних сил та обертального моменту, діючих на судно.

Значення сил та моментів у правій частині рівнянь (3.3) залежать від швидкостей та координат судна, характеристик його корпусу, засобів управління, зовнішніх умов. У дослідженнях з гідромеханіки та керованості судна, функціональні залежності цих сил й моментів, подаються різними ступеневими та тригонометричними функціями зазначених характеристик руху [20]. Тому у рівняння можуть входити додаткові нелінійні доданки, що містять проекції лінійної та кутової швидкостей руху судна. Подібні розширені моделі використовувалися для вирішення завдань управління [48].

При вирішенні завдання ідентифікації моделі руху судна сили та моменти, що входять до рівнянь (3.3), за аналогією з [48, 55], пропонується

подати для спрощення лінійними функціями управляючих впливів на судно:

$$\begin{aligned} F_x &= b_1 n + b_2 \delta, \\ F_y &= b_3 n + b_4 \delta, \\ M_z &= b_5 n + b_6 \delta, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де n – частота обертання гвинта, об/хв.; δ – кут перекладки керма, град; b_i – коефіцієнти сил та моментів керма та гвинта, що підлягають ідентифікації.

При зазначеному способі апроксимації зовнішні впливи на коефіцієнти (b_i) будуть нелінійними функціями швидкостей руху та інших параметрів, які враховуватимуть вплив умов плавання в моделі руху судна [48]. Структуру ідентифікованої моделі руху судна (3.4) для використання програмних додатків і подальшого моделювання доцільно подати у формі рівнянь стану в розгорнутому вигляді, розділивши всі доданки (3.4) на коефіцієнти при похідних:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1M} - x_{2M} &= 0, \\ \dot{x}_{2M} + a_{1M}x_{4M}x_{6M} + a_{2M}n + a_{3M}\delta &= 0, \\ \dot{x}_{3M} - x_{4M} &= 0, \\ \dot{x}_{4M} + a_{4M}x_{2M}x_{6M} + a_{5M}n + a_{6M}\delta &= 0, \\ \dot{x}_{5M} - x_{6M} &= 0, \\ \dot{x}_{6M} + a_{7M}x_{2M}x_{4M} + a_{8M}n + a_{9M}\delta &= 0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} a_{1M} &= \frac{m + \lambda_2}{m + \lambda_1}, a_{4M} = \frac{m + \lambda_1}{m + \lambda_2}, a_{7M} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{I_z + \lambda_3}, \\ a_{2M} &= \frac{b_1}{m + \lambda_1}, a_{5M} = \frac{b_3}{m + \lambda_2}, a_{8M} = \frac{b_5}{I_z + \lambda_3}, \\ a_{3M} &= \frac{b_2}{m + \lambda_1}, a_{6M} = \frac{b_4}{m + \lambda_2}, a_{9M} = \frac{b_6}{I_z + \lambda_3}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_{1M} = x_{2M} = V_x; \dot{x}_{3M} = x_{4M} = V_y; \dot{x}_{5M} = x_{6M} = \omega;$$

$$x_M = [x_{1M}, \dots, x_{6M}]^T, A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]^T,$$

де x_M – вектор стану адаптивної моделі судна; A_M – вектор параметрів моделі, що налаштовуються, значення складових якого віднесено до маси та моменту інерції судна відповідно; T – векторний знак транспонування.

Аналіз керованості судна і побудова систем управління за нелінійними рівняннями (3.3) мають певні труднощі. Тому для виявлення головних закономірностей руху судна, як правило, приймають ряд припущень для лінеаризації вихідних рівнянь (3.3), (3.4) та спрощення їх розв'язання.

З позиції управління об'єкти можна розділити на SISO (з одним входом та одним виходом) та MIMO (кілька входів та кілька виходів). Останні об'єкти характеризуються наявністю багатозв'язаності, тобто є вплив кожного з керуючих входів за кожен вихід. Перехід до багатозв'язаності, як правило, не викликає труднощів і не вимагає перегляду математичного апарату [49].

Для початкового етапу та порівняння різних методів ідентифікації розглянемо процедури ідентифікації на прикладі SISO системи. Дискретну модель стану лінійної динамічної системи руху судна можна представити як:

$$\begin{aligned}x(t + T_s) &= Ax(t) + Bu(t) + Ze(t), \\y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t),\end{aligned}\tag{3.7}$$

де t , T_s – поточний момент часу та довжина такту управління; x – вектор стану заданої розмірності; $x(t)$, $e(t)$ – початковий стан та похибка системи; u – вхід системи (управління); y – вихід системи (кутова швидкість); A, B, C, D, Z – матриці стану, управління, виходу, вимірюваного входу, похибок відповідної розмірності.

Для SISO-систем розмірність вектору стану дорівнює порядку передавальної функції. Останній компонент вектору стану дорівнює вихідному параметру (y), а кожен наступний компонент дорівнює похідній останнього заданого. Відповідно до певного порядку моделі, за формулою (3.3) (див. табл. 3.3), складові вектору стану задаються так:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T,$$

$$x_1 = y, \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt}, \quad x_3 = \frac{dx_2}{dt}, \quad x_4 = \frac{dx_3}{dt}.$$

Початкова ідентифікація моделі зміни кутової швидкості судна від положення пера руля (3.7) здійснювалася в програмному середовищі MATLAB, використовуючи метод наближення даних – апроксимацію за методом найменших квадратів. Визначені параметри моделі масиву даних, представлених графічно на рис. 3.2, мають такі значення:

$$A = \begin{bmatrix} 0,7488 & 0,1313 & 0,01109 & 0,004311 \\ 0,3057 & 0,5785 & -0,4869 & -0,01523 \\ 0,0858 & -0,1686 & 0,2392 & 0,8227 \\ 0,006138 & -0,0111 & -0,5729 & 0,5768 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,01392 \\ -0,03871 \\ -0,01463 \\ -0,01824 \end{bmatrix},$$

$$C = [146,5 \quad 6,818 \quad -2,484 \quad 0,4957], \quad D = 0, \quad Z = \begin{bmatrix} 0,006434 \\ 0,03156 \\ 0,001706 \\ -0,002866 \end{bmatrix},$$

Результати моделювання кутової швидкості повороту судна за отриманим даним моделі в порівнянні з рядом вимірів кутової швидкості повороту судна наведені на рис. 3.6.

Графічний аналіз свідчить, що отриманий прогноз ідентифікованої моделі досить точно описує сформований характер реального руху судна. Ряд фактичних значень навчальної вибірки відповідає результатам моделювання, основні характеристики ряду вимірів кутової швидкості повороту судна, як у період циркуляції, так і в період неусталеної циркуляції виявлено з достатньою подробицею та точністю.

У роботах [20, 47, 48] для деякого спрощення дослідження маневрених якостей судна, а також побудови систем керування окремими координатами (кутовою швидкістю, курсом) при лінеаризації рівнянь (3.4)

використовуються моделі передавальної функції судна за керуючими та збурюючими впливами даних координат. Такі моделі визначаються як відношення перетворення Лапласа вихідного та вхідного сигналів за нульових початкових умов, що, з урахуванням властивостей даного перетворення дозволяє отримати її у такому вигляді:

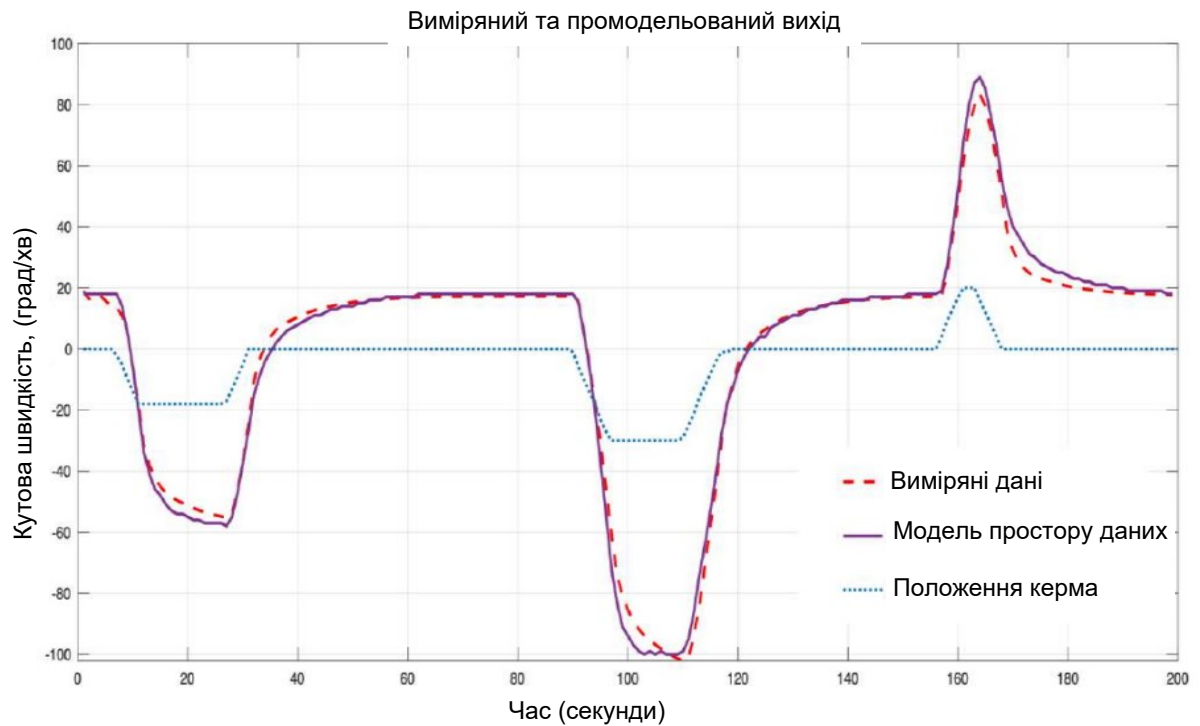


Рисунок 3.6 – Ідентифікація моделі зміни кутової швидкості положення пера керма у просторі станів
(Джерело – розроблено автором)

$$W(p) = \frac{P\{y(t)\}}{P\{u(t)\}} = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{\sum_{j=0}^{nb} b_j p^j}{\sum_{j=0}^{na} a_j p^j}, \quad (3.8)$$

де p – символ перетворення Лапласа; $p = a + j\omega$ – оператор Лапласа.

Для вирішення завдань у галузі керованості судна в якості моделі рекомендується модель кутового руху судна у вигляді передавальної функції першого та другого порядків, відома як модель Номото (Nomoto) [50]:

$$W(p) = \frac{K_p}{p(T_p + 1)}, \quad (3.9)$$

$$W(p) = \frac{K_p(T_0 p + 1)}{p^2(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (3.10)$$

де K_p – коефіцієнт управління (підсилення); T_0, T_1, T_2 – постійні часу.

Значення параметрів передавальних функцій судна (3.9), (3.10) визначаються через його гідродинамічні характеристики та залежать від швидкості, завантаження та інших факторів. Значення постійних часу (T_1) на 1-2 порядку більше постійних часу (T_2). Значення визначених параметрів передавальних функцій та даних постійних часу наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Визначені параметри моделей

(Джерело – розроблено автором)

Модель першого порядку	Модель другого порядку
$K_p - 4,3896$	$K_p - 4,4415$
$T_p - 6,7134$	$T_1 - 7,4904$
-	$T_2 - 0,018123$
-	$T_0 - 0,1$

Результати моделювання руху судна за допомогою передавальних функцій першого (3.9) та другого (3.10) порядків у порівнянні з вимірами наведено на рис. 3.7.

Графічний аналіз моделювання руху судна за допомогою функцій (3.9) та (3.10) свідчить, що отриманий прогноз описує динаміку кутової швидкості судна, що склалася дещо гірше, ніж модель простору станів (3.7).

Результати моделювання кутової швидкості судна при маневруванні за формулами (3.9), (3.10) дещо «відстають» від низки фактичних значень навчальної вибірки. На початковому етапі моделювання (з 0 по 10 с) спостерігаються деякі коливання. Але основні характеристики ряду у періоди циркуляції, як сталої, так і тої, яка не встановилася, не виявлено.

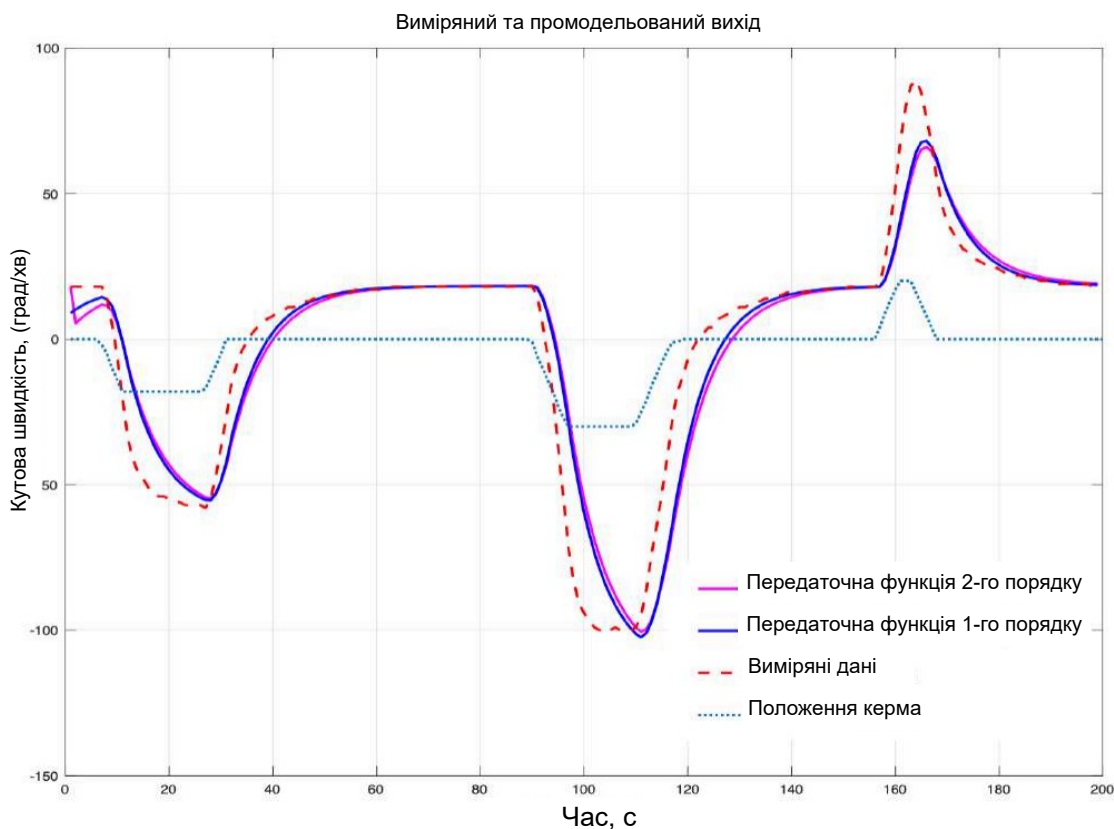


Рисунок 3.7 – Ідентифікація моделі зміни кутової швидкості положення пера керма передавальною функцією першого та другого порядку
(Джерело – розроблено автором)

Формули (3.7), (3.9), (3.10) досить точно описують поведінку судна у режимі маневрування на тихій воді при малих кутах перекладки керма. Однак, при великих кладках керма та при плаванні на хвилюванні динаміка судна стає суттєво нелінійною й результати моделювання за цими моделями руху судна можуть значно відрізнятись від реальних вимірювань.

При вирішенні завдань прогнозування та управління рухомими об'єктами широкого поширення набули регресійні моделі [50]. Метою регресійного аналізу вважається визначення залежностей між множиною зовнішніх факторів (регресорів) та початкової змінної. Для визначення коефіцієнтів регресії найчастіше використовується метод найменших квадратів або метод максимальної правдоподібності.

Лінійні регресійні моделі є найпростішим варіантом математичного опису різних процесів. В основу таких моделей закладена гіпотеза, що

зовнішній дискретний фактор $u(t)$, впливає на досліджуваний процес $y(t)$, при цьому зв'язок між вхідним та вихідним впливом на систему лінійний. Модель прогнозування майбутніх значень системи на основі лінійної регресії представляється рівнянням:

$$y(t) = a_0 + a_1 u(t) + e(t), \quad (3.11)$$

де a_i – коефіцієнт регресії; $e(t)$ – похибка моделі.

Для отримання прогнозних значень виходу $y(t)$ в момент часу t необхідно мати значення входу $u(t)$ в той самий момент часу дані моделі (3.11) суттєво лінійні, не враховують минулі вхідні значення та слабо застосовні у рішенні задачі прогнозування руху судна

Множинні регресійні моделі враховують дію на вихідне прогнозне значення $y(t)$ множини зовнішніх факторів (управляємих та неуправляємих) $u_1(t), \dots, u_n(t)$. У даному випадку модель прогнозування має вигляд:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i u_i(t) + e(t). \quad (3.12)$$

Недоліки регресійної моделі (3.12) аналогічні недолікам лінійних регресійних моделей.

Авторегресійні моделі (ARX) включають гіпотезу, що значення вихідного процесу $y(t)$ залежить лінійно від визначеної кількості попередніх значень того ж самого процесу: $y(t-1), \dots, y(t-p)$.

Модель прогнозування, побудована на авторегресійній моделі, має таку структуру:

$$y(t) = \sum_{i=0}^n a_i y(t-i) = \sum_{i=i}^n b_i u(t-i) + e(t), \quad (3.13)$$

де na – кількість попередніх вихідних умов; nb – кількість попередніх вхідних умов, які були використані для прогнозування поточного виходу.

На практиці, як правило, всі системи є нелінійними, і вихідний сигнал є нелінійною функцією вхідних змінних. У разі якщо, незважаючи на покращення моделі шляхом зміни її структури або порядку, лінійна авторегресійна модель погано узгоджується з виміряними вихідними даними, можливе застосування нелінійних авторегресійних моделей, які мають більшу гнучкість при описі складних процесів, ніж лінійні моделі аналогічних систем.

Нелінійні авторегресійні моделі NLARX.

Дані нелінійні моделі розширюють лінійні моделі ARX до нелінійного випадку. Структура цих моделей дозволяє моделювати складну нелінійну поведінку за допомогою гнучких нелінійних функцій, таких як вейвлет та сигмовидні функції. Даний вид моделей має таку структуру:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-na), u(t-nk), \dots, u(t-nk-nb+1)), \quad (3.14)$$

де f – функція, яка залежить від кінцевої кількості попередніх входів $u(t)$ та виходів $y(t)$.

Входи функції (3.14) є модельними регресорами. Структуру нелінійної моделі NLARX можна відобразити у вигляді схеми (рис. 3.8).

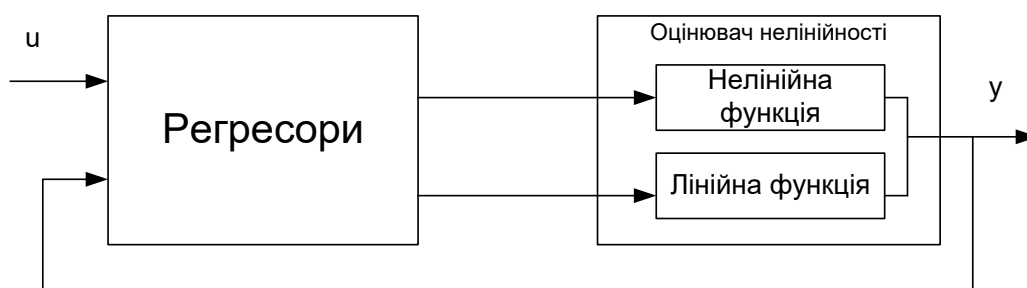


Рисунок 3.8 – Структура нелінійної моделі NLARX

(Джерело – розроблено автором)

Ця структура враховує, що поточний вихід $y(t)$ прогнозується як зважена сума минулих вихідних значень, поточних і минулих вхідних значень.

Всі регресори є вхідними даними для лінійного і нелінійного блоків. Блок оцінки нелінійності, своєю чергою, відображає регресори на виході моделі, використовуючи комбінацію нелінійних та лінійних функцій. Нелінійна функція у формулі (3.14) використовується у вигляді вейвлета.

Вейвлет-аналіз є частиною частотно-часового аналізу [50], в якому роль простих коливань відіграють функції особливого роду, що називаються вейвлетами. Базова функція вейвлет – це деяке коротке коливання, але не лише. Поняття частоти спектрального аналізу замінено тут масштабом, і щоб перекрити короткими хвилями всю часову вісь, введено зсув функцій у часі. Базис вейвлетів – це функції типу:

$$f((t - b)/a), \quad (3.15)$$

де b – зсув; a – масштаб.

Функція $f(t)$ у формулі (3.15) має нульову площину та осцилює біля деякого значення часу $t - b$. Фур'є-перетворення таких функцій має вигляд смугового фільтра та при різних значеннях масштабного параметра (a) це – набір смугових фільтрів. Сімейства вейвлетів у часової або частотної області використовуються для подання сигналів та функцій у вигляді суперпозицій вейвлетів на різних масштабних рівнях декомпозиції (розкладання) сигналів. Вигляд такого вейвлета мають нелінійні оцінки моделей ARX $g(x)$:

$$g(x) = \sum_{n=0}^n a_n f(p), \quad \rho = \beta_n(x(t - \gamma_n)), \quad (3.16)$$

де $g(x)$ – нелінійні оцінки моделі ARX; $f(p)$ – базисний вейвлет; ρ – регресор; β_n – функція регресора; a_n – координати сигналу в обраному

базисі; x – сигнал, який приймає участь у формуванні регресора; γ_n – часова затримка сигналу x .

Нелінійні моделі Гаммерштайна-Віннера (Hammerstein-Weiner) NLHW описують динамічні системи, використовуючи один або два статичні нелінійні блоки, послідовно з'єднані з лінійним блоком, рис. 3.9 [50]. Лінійний блок є дискретною передатною функцією, яка представляє динамічний компонент моделі.



ЛЕ – лінійний елемент; НЕ – нелінійний елемент системи

Рисунок 3.9 – Структура моделі Гаммерштайна-Віннера

(Джерело – розроблено автором)

У даній моделі при відомій вхідній частині $u(t)$ якщо відома функціональна залежність від вхідного сигналу (вид нелінійності), що вводиться в результаті його перетворення (НЕ), і завдання ідентифікації зводиться до визначення параметрів лінійної частини (ЛЕ) (див. рис. 3.9).

$$w(t) = f(u(t)), \quad x(t) = Aw(t), \quad (3.17)$$

де перша частина формули (3.17) – результат та функція нелінійного перетворення, а друга частина – результат лінійного перетворення.

Якщо функціональна залежність НЕ невідома, будується таблиця цієї нелінійної залежності, за цією таблицею будь-якою формулою, що інтерпретує, отримується апроксимуючий поліном необхідної нелінійності $f(u(t))$, визначається, чи відповідають йому лінійне перетворення $w(t)$, та вирішується завдання ідентифікації:

$$\begin{aligned}
 w(t) &= f(u(t)), \\
 x(t) &= Aw(t) = Af(u(t)), \\
 y(t) &= g(t) = g(Af(u(t))).
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Результати ідентифікації нелінійних регресійних моделей NLARX, NLHW та подальше моделювання кутової швидкості при русі судна в середовищі MATLAB, наведені на рис. 3.10.

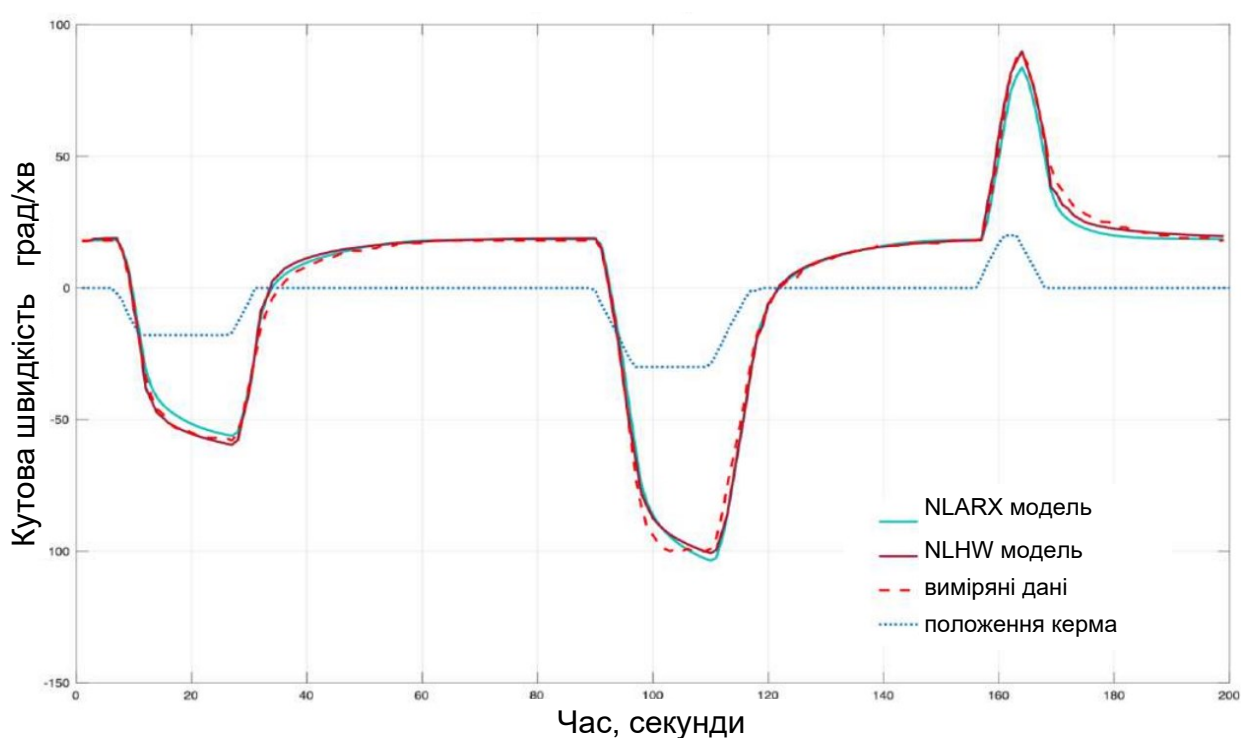


Рисунок 3.10 – Ідентифікація динамічної системи нелінійними моделями
(Джерело – розроблено автором)

Графічний аналіз результатів моделювання свідчить, що отриманий прогноз ідентифікованих нелінійних моделей (3.14), (3.18) описує динаміку зміни кутової швидкості при русі судна з високою точністю. Ряд фактичних значень навчальної вибірки відповідає результатам моделювання, основні характеристики ряду як у період встановленої циркуляції, так і у період не встановленої циркуляції моделюванням виявлено досить докладно та точно.

Головними перевагами такого класу моделей є їх простота та прозорість моделювання, а також однаковість аналізу та проектування.

3.4 Оцінювання методу ідентифікації моделей руху судна в стиснутих водах

Крім графічного аналізу, найважливішим етапом ідентифікації моделей об'єктів є кількісна перевірка якості методу за обраним критерієм близькості виходу моделі та об'єкта. Тобто порівняння відхилень прогнозу від вимірів разом на всьому інтервалі оцінки.

В якості такого критерію пропонується прийняти оцінку адекватності методу у вигляді відношення функцій норми вектору відхилень прогнозу від вимірювань щодо одиниці до норми вектору відхилень вимірів від середнього значення (fit), яка обчислюється так:

$$fit = 100 * \left(1 - \frac{norm(\hat{y} - y)}{norm(y - mean(y))} \right), \quad (3.19)$$

де fit - критерій адекватності моделі; y – виміряні вихідні параметри; \hat{y} – прогнозні значення; $norm(\hat{y} - y)$ – функція розрахунку норми вектора; $mean(y)$ – функція розрахунку середнього значення.

За результатами ідентифікації за формулами (3.7), (3.9), (3.10), (3.14), (3.18), розглянутих у другому розділі моделей кутової швидкості руху судна, значення критеріїв оцінок їх якості за формулою (3.19) наведено в табл. 3.5, з якої видно, що найкращі можливості ідентифікації дають моделі, наведені у просторі станів (3.7) та регресійні NLARX (3.14), NLHW (3.18).

Окрім оцінки якості ідентифікації за допомогою формули (3.19), у роботі проведена додаткова перевірка моделей кутової швидкості руху судна, що не бере участі у навчальному (незалежному) валідаційному наборі даних.

Таблиця 3.5 – Оцінка критерію якості ідентифікації

(Джерело – розроблено автором)

Модель	Номер формули	Оцінка ідентифікації	Оцінка ідентифікації на незалежному наборі даних
Передаюча функція 1-го порядку	(3.9)	67,63	64,21
Передаюча функція 2-го порядку	(3.10)	64,02	61
Простір станів	(3.7)	91,48	89,65
NLARX	(3.14)	91,56	90,6
NLHW	(3.18)	93,49	92,4

Валідаційний набір даних відповідає маневруванню судна за незмінних умов зовнішньої обстановки (див. рис. 3.5). Результати порівняльного моделювання ідентифікованих вище моделей зміни кутової швидкості повороту судна на незалежному наборі експериментальних даних наведені на рис. 3.10.

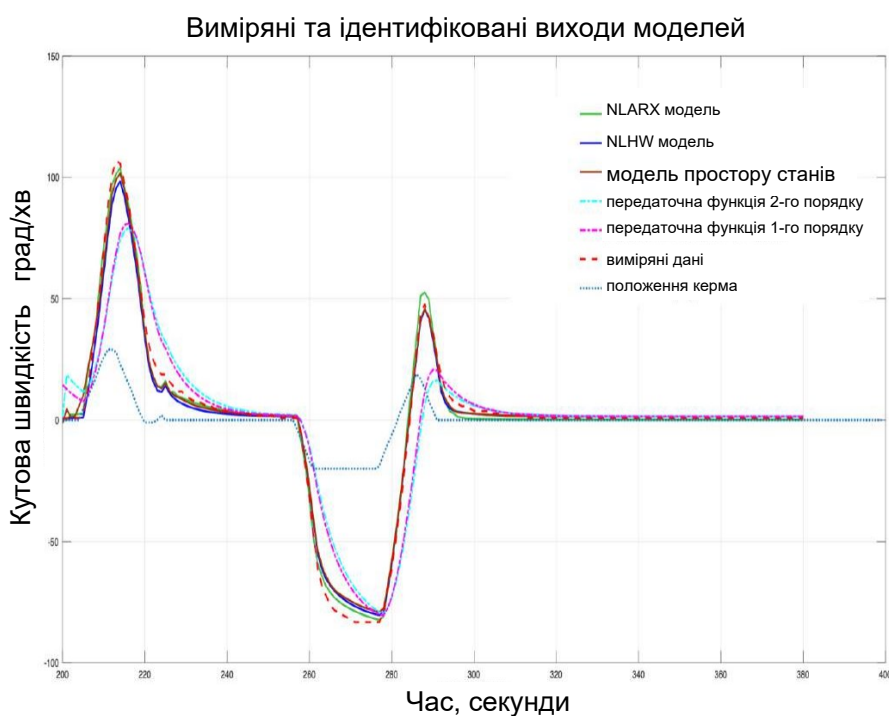


Рисунок 3.10 – Результат оцінки якості моделювання кутової швидкості судна на незалежному наборі даних
(Джерело – розроблено автором)

Графічний аналіз результатів моделювання свідчить, що найкращі результати ідентифікації та прогнозування стану об'єкта показали лінійна модель у просторі станів (3.7), нелінійна авторегресійна модель (3.14) та нелінійна модель Гаммерштайна-Віннера (3.18), які необхідно використати при побудові знання-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень судноводіння. Моделі на основі передавальних функцій 1-го (3.9) та 2-го порядку (3.10) показують деяке запізнення від вимірних даних, а також на початковому етапі спостерігаються деякі «викиди».

3.5 Адаптивний метод управління маневрування судна на мілководді за критерієм узагальненої роботи

Одним із шляхів оптимізації управління рухом судна в різних умовах плавання є створення систем, що застосовують метод, здатний адаптуватися відповідно до цих умов. Однак перебудова параметрів моделі або її зв'язків на підставі маневрених якостей, отриманих у процесі ходових випробувань судна, не може дати прийнятних результатів через значну кількість факторів, що впливають на рух судна, та складності їх аналітичного представлення. Широкі можливості надаються при використанні адаптивних методів, які налаштовуються на підставі завдання ідентифікації модельованого процесу з реальним процесом руху судна в момент настроювання.

На підставі попередніх досліджень, принципи формування процесів ідентифікації та адаптації параметрів моделі руху судна пропонується подати функціональними елементами (рис. 3.11).

Порядок функціонування елементів розробленої схеми полягає в такому.

У кожний момент часу до входів судна та адаптивної моделі додані керуючі дії (U). На судно діють також зовнішні збурення (F), які можуть бути вимірюваними. Вектор стану судна (X) залежить від керуючого впливу, зовнішніх збурень та вектора параметрів моделі судна на даний момент (A),

отриманий на попередньому етапі ідентифікації (див. розділ 2), що характеризують динамічні якості судна.

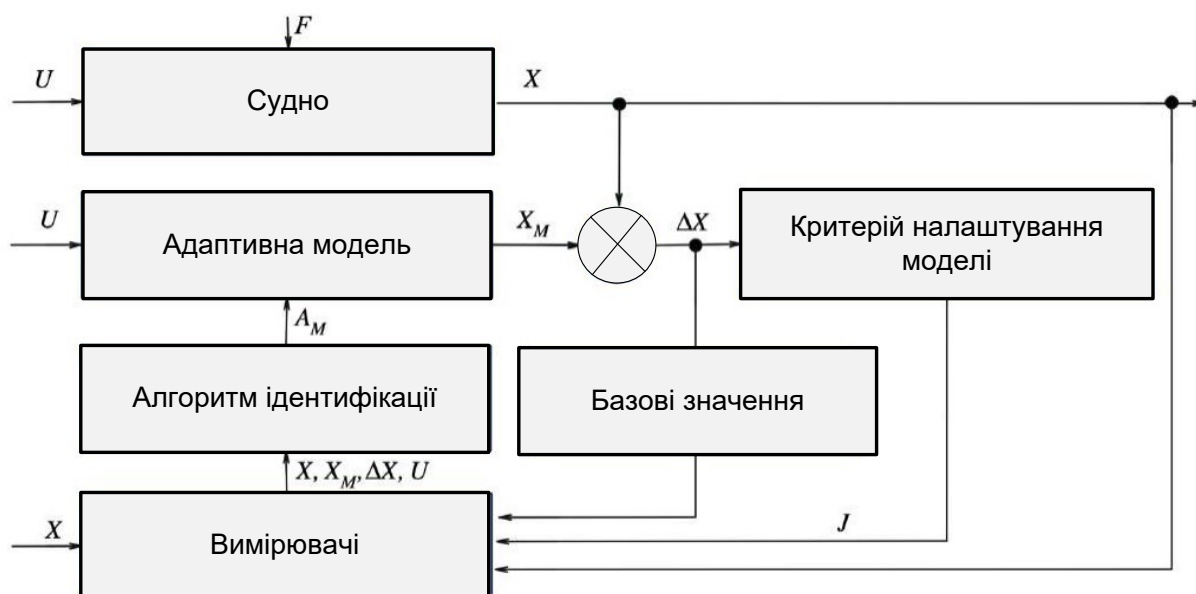


Рисунок 3.11 – Узагальнена адаптивна модель руху судна

(Джерело – розроблено автором)

Вектор стану адаптивної моделі (X_M) залежить від вектору настроюваних параметрів (A_M), які перераховуються за поточним алгоритмом ідентифікації. Цей алгоритм функціонує на основі обробки вимірювань вектору стану судна та моделі, їх неузгодженості ($\Delta X = X - X_M$), критеріїв якості та налаштування адаптивної моделі (J). Оскільки алгоритм ідентифікації визначається прийнятою адаптивною моделлю ідентифікованого об'єкта та критерієм якості ідентифікації, що оцінює їх близькість, однозначний вибір алгоритму можливий лише за однозначного вибору адаптивної моделі та критерію.

Теорія ідентифікації надає широкий вибір настоюваних моделей [12, 50]. Однак, як правило, ці математичні моделі можуть бути застосовні для часткових режимів руху судна. У статті [48] досліджується узагальнена адаптивна прогнозуюча модель руху судна за різних умов плавання. В якості вихідної для подальшої адаптації пропонується використовувати нелінійну модель руху судна (3.5), представлену у просторі станів (3.6). Адаптивну

ідентифікацію моделі (3.6), як процес управління її параметрами на відповідність реальному руху судна, пропонується здійснювати методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) за мінімумом квадратичного критерію узагальненої роботи (КУР), тобто сумарних дій керуючих впливів та неузгодженості виходів адаптивної моделі з реальним рухом судна (див. рис. 3.11). Метод АКОР для синтезу систем управління та поняття критерію узагальненої роботи отримали апробацію та додатки у дослідженнях з розробки систем навігації та управління судном [47, 48].

Квадратичним КУР оцінки якості ідентифікації моделі руху судна (3.6) є:

$$J = W_K[\Delta X, X_M, A_M] \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} \Delta X^T Q_x \Delta X \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) dt + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} [U_A^T K_A^{-2} U_A + U_{A,op}^T K_A^{-2} U_{A,op}] dt; \quad (3.20)$$

$$K_A^{-2} = K^2 \exp\left(\frac{2t}{T_j}\right),$$

де J – квадратичний КУР оцінки якості ідентифікації;

W_K – квадратична функція кінцевої оцінки якості ідентифікації;

Q_x – діагональна матриця квадратичної форми неузгодженості векторів стану моделі та реального судна;

K_A^{-2} – діагональна матриця ваги доданків критерію якості ідентифікації (обирається пропорційно швидкостям зміни настановлених параметрів);

T – інтервал оптимізації процесу адаптації моделі;

T_j – постійна часу згасання критерію узгодження;

U_A – вектор управління процесом ідентифікації (відповідає швидкості зміни налаштовуваних параметрів).

Оскільки процес ідентифікації нелінійний та нестационарний, експоненційні множники введені для забезпечення позитивної визначеності

мінімізуючої функції критерію узгодження (3.20) та його згасання. Його застосування далі підтверджується результатами моделювання.

Таким чином, завдання ідентифікації зводиться до оптимізації КУР (3.20) управління швидкостями зміни настроюваних параметрів узагальненої адаптивної моделі (3.6).

Відповідно до основної теореми аналітичного конструювання оптимальних регуляторів КУР (3.20), оптимізація управління перебудовою параметрів адаптивної моделі з урахуванням змін, аналогічних наведеним у роботах [47, 48], зводиться до розв'язання матричних лінійних рівнянь, що мінімізують неузгодженість руху моделі з реальним процесом:

$$\begin{aligned} \dot{P}_X + \frac{1}{T_J} P_X - J_X^T P_X &= -Q_X [X_M - X]; & P_X &= \left[\frac{\partial W_M}{\partial X_M} \right]; \\ \dot{P}_A + \frac{1}{T_J} P_A &= J_X^T P_X; & P_A &= \left[\frac{\partial W_A}{\partial X_A} \right]; \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$J_X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_{4M}x_{6M} & 0 & a_{7M}x_{4M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{6M} & -1 & 0 & 0 & a_{7M}x_{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{4M} & 0 & a_{4M}x_{2M} & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.22)$$

$$J_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{4M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{4M} & n & \delta \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

де P_X – вектор проєкцій функції W_K , що мінімізує критерій (3.20), на вектор стану моделі судна; P_A – вектор проєкцій функції W_K на вектор налаштованих параметрів моделі; J_X , J_A – матриці Якобі, утворені з функціональних залежностей рівняння стану моделі (3.6) за векторами стану й параметрами.

У результаті шукане оптимальне керування швидкістю налаштування параметрів адаптивної моделі (3.6), що забезпечує мінімум КУР (3.20) та її узгодження з реальним рухом судна, набуде вигляду:

$$U_{\text{оп}} = \dot{A}_M = K_A^{-2} P_A. \quad (3.24)$$

Розв'язання систем диференціальних рівнянь (3.22)-(3.24) дає адаптивну модель горизонтального руху судна, настроювану значеннями гідродинамічних коефіцієнтів, оптимальних за КУР (3.20) для конкретного режиму руху та умов плавання. При роботі алгоритму ідентифікації та оптимізації адаптивної моделі її параметри будуть залежати від поточних вимірювань вектора стану (X) та вектора стану адаптивної моделі (X_M) (рис. 3.12).

Отже, похибки вимірювання вектора стану судна будуть корельованими з похибками параметрів моделі. Тому матрицю квадратичної форми (Q_X) похибок моделі в КУР (3.2) доцільно задавати у вигляді коваріаційної матриці похибок вимірів ($Q_X = R^{-1}$).

Для роботи методу адаптації (3.22)-(3.24) моделі маневрування судном на мілководді (3.6) в якості початкових умов доцільно використовувати значення векторів стану та параметрів, характерних для режимів руху конкретного судна прямому курсі, циркуляції.

З фізичного погляду алгоритми адаптації моделі (3.22)-(3.24) представляють динамічну систему, зовнішнім впливом на яку є неузгодженість між векторами стану моделі та судна [$X_M - X$]. Динаміка даної системи залежить від параметрів моделі (3.6) її стану та постійного часу згасання критерію якості (T_j).

Постійна часу згасання, у свою чергу, повинна обиратися в залежності від нестационарності моделі руху судна (3.6). Малі значення постійного часу методу адаптації (3.22)-(3.24) відповідатимуть локальній оптимізації властивостей моделі (3.6), тобто, в околиці цієї точки траєкторії руху судна, та диференціальні рівняння (3.24) перетворюються в алгебраїчні. Такі

значення постійного часу згасання доцільно вибирати для малих відрізків руху (маневрування) судна. Значення постійного часу загасання на тривалих ділянках руху судна необхідно обирати відповідно більшими для оптимізації параметрів моделі (3.6) для всієї ділянки руху судна.

Рівняння (3.24) є інтегруючими ланками, виходами, які у разі збільшення значень параметрів залежать від величини вхідного сигналу (P_A) та коефіцієнтів відповідних посилень (K_A^2) системи адаптації.

Отже, значення параметрів моделі матимуть збільшення при ненульових розв'язках рівнянь (3.21), тобто за наявності неузгодженостей векторів станів моделі та судна (див. рис. 3.12). Результати рішень рівнянь (3.21) можуть бути ненульовими навіть за умови збігу векторів станів моделі та судна, й у даному випадку залежатимуть від самих параметрів судна (3.24), а також значень вектора стану моделі (2.5). Таке явище характерне при повороті судна або зміні режиму роботи двигуна. Це повністю підтверджує реальні фізичні процеси, що відбуваються при маневруванні судна, які впливають з теоретичних та експериментальних досліджень з керованості судна. Для підтвердження теоретичних положень проводилось експериментальне моделювання за даними руху імітаційної моделі швидкохідного, стійкого на курсі судна водотоннажністю 700 т на спокійній воді зі швидкістю 14 вузлів, отримані з використанням судноводійського тренажера.

За формулами (3.5) у середовищі MATLAB Simulink побудовано модель руху судна у системі прямокутних координат. Вихідні параметри моделі руху судна $A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]$ обрані довільно на підставі рекомендацій, наведених у роботі [27] (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Початковий довільний набір коефіцієнтів моделі
(Джерело – розроблено автором)

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	0,0005	a_{4M}	0,0001	a_{7M}	0,011
a_{2M}	0,00004	a_{5M}	0,00004	a_{8M}	0,000001
a_{3M}	0,0000001	a_{6M}	0,013	a_{9M}	0,2542

Результати моделювання наведені на рис. 3.12.

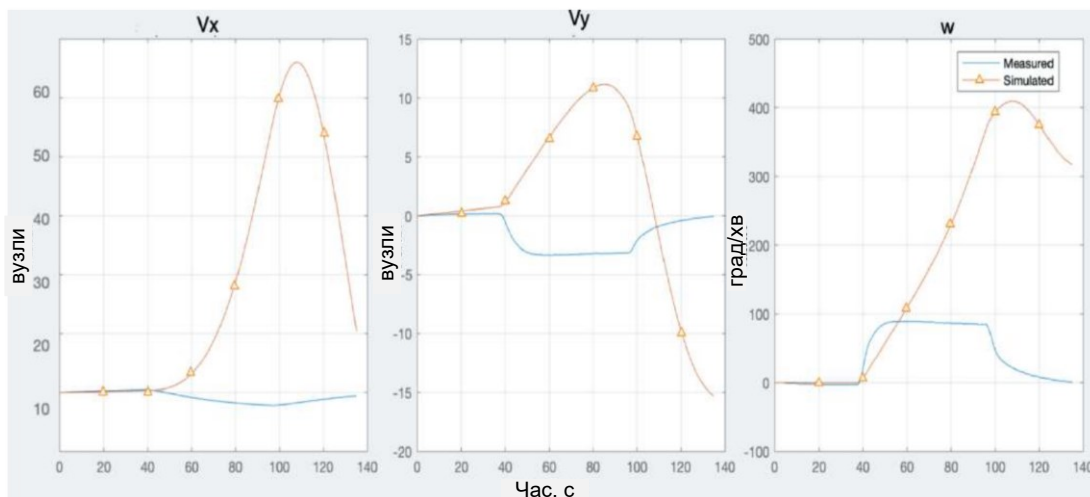


Рисунок 3.12 – Моделювання руху судна на повороті з вихідним набором параметрів моделі (Джерело – розроблено автором)

Далі на основі вихідних параметрів моделі (3.5) налаштовуються або адаптуються її параметри у процесі маневрування за цими ж вимірами за допомогою формул (3.22)-(3.24) (рис. 3.13).

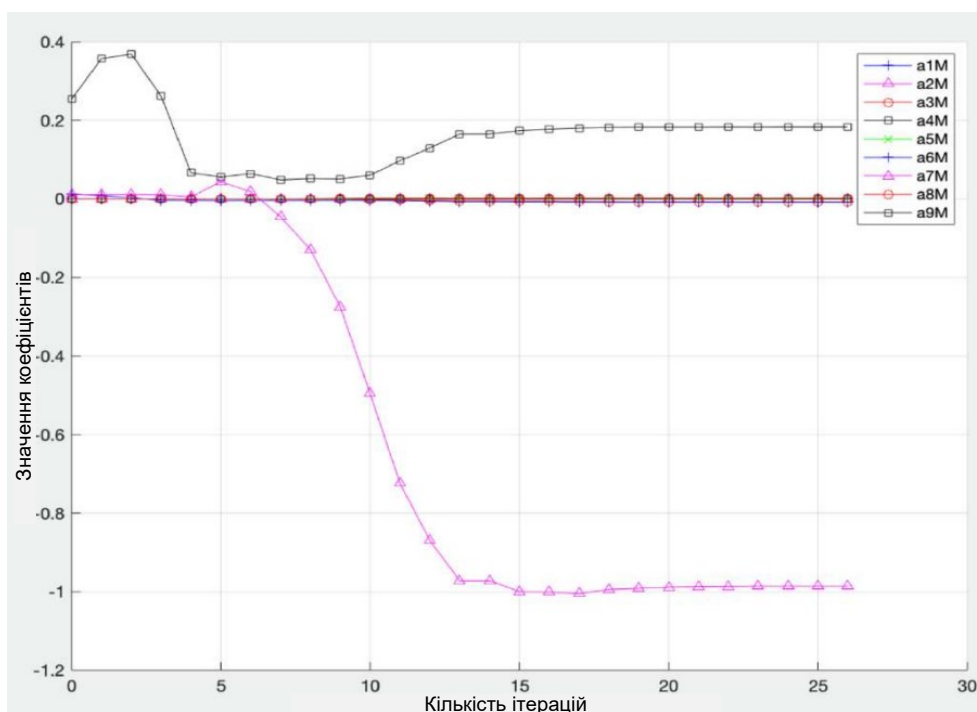


Рисунок 3.13 – Ідентифікація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті (Джерело – розроблено автором)

Процес налаштування та зміни коефіцієнтів моделі наведений на, з якого видно, що процес адаптації зайняв 26 ітерацій, а найбільших змін зазнали лише коефіцієнти (a_{7M}) та (a_{9M}), що враховує вплив проекцій лінійних швидкостей та перекладання керма.

Значення уточнених ідентифікованих параметрів моделі (3.5) наведено в табл. 3.7, а результати моделювання руху судна з підстроєними алгоритмом адаптації ідентифікованими параметрами моделі – на рис. 3.14, що демонструє значне покращення якості прогнозування руху судна в порівнянні з даними рис. 3.13.

Таблиця 3.7 – Значення ідентифікованих коефіцієнтів моделі руху
(Джерело – розроблено автором)

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000289	a_{4M}	0	a_{7M}	-0,98612
a_{2M}	0,0001104	a_{5M}	0,0015117	a_{8M}	0,0020759
a_{3M}	-0,007399	a_{6M}	-0,008235	a_{9M}	0,18333

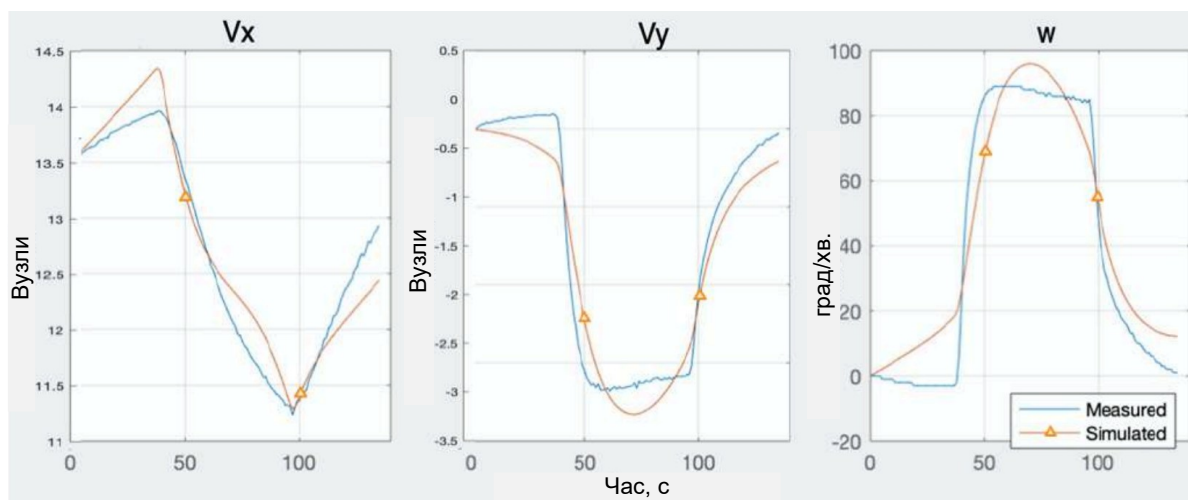


Рисунок 3.14 – Моделювання руху судна на повороті з ідентифікованим набором параметрів моделі руху судна (Джерело – розроблено автором)

Перевірка працездатності моделі руху судна (3.5) проводиться на незалежному наборі даних, отриманих при маневруванні у змінних умовах плавання (вітер 10 м/с – 1 400, хвилювання моря 2,0 м – 1 600) (рис. 3.15).

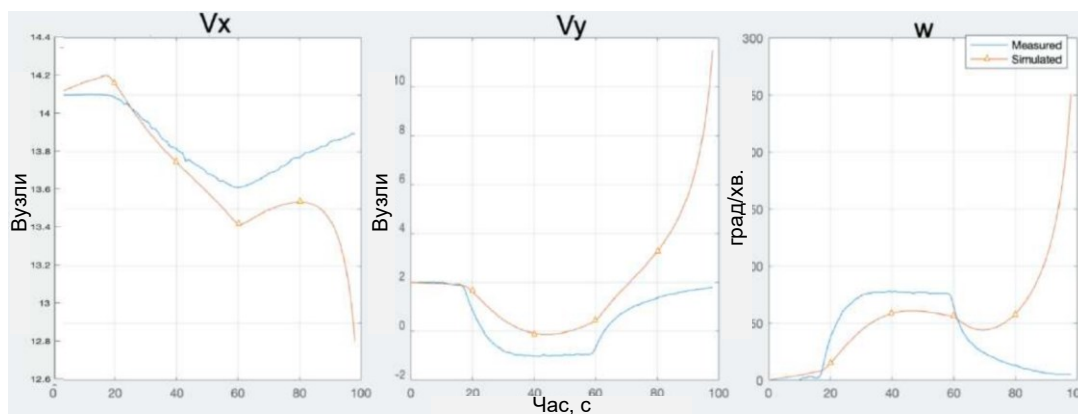


Рисунок 3.15– Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання (Джерело – розроблено автором)

Результати свідчать, що елементи руху судна з коефіцієнтами інших умов значно відрізняються від вимірювань параметрів руху судна, особливо після 60-ої секунди маневру. Це підтверджує необхідність їх адаптації.

Процес переналаштування параметрів адаптивної моделі (3.5) за формулами (3.22)-(3.24) під час руху судна на повороті наведено на рис. 3.16.

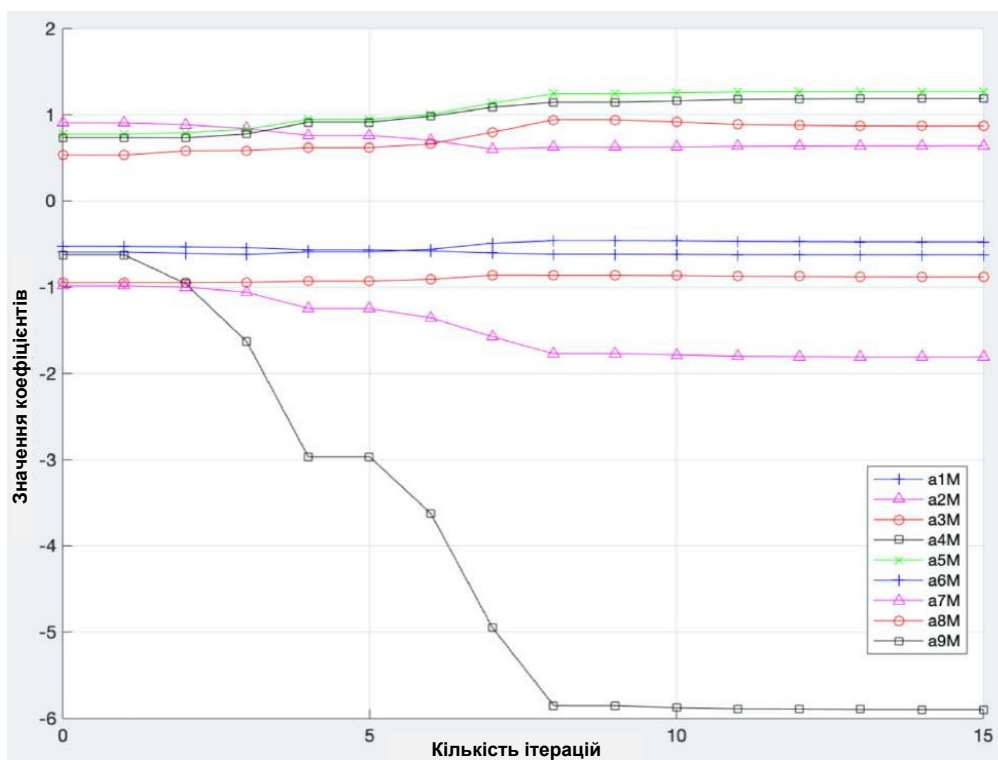


Рисунок 3.16 – Адаптація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті (Джерело – розроблено автором)

Кількість ітерацій при адаптації коефіцієнтів моделі руху судна у даному випадку знизилася до 15, найбільшій зміні піддався коефіцієнт (a_{9M}), що враховує вплив перекладки керма у мінливих умовах плавання. Як зазначалося вище, коефіцієнти моделі руху судна (3.5) змінюються під впливом різних факторів та повинні підлаштовуватися, зокрема, до зовнішніх умов плавання судна. Значення адаптованих параметрів моделі (3.5) під нові, відмінні від попередніх, умови плавання судна наведені в табл. 3.8. Результати моделювання руху за адаптованою моделлю судна (3.5) до нових умовах наведена на рис. 3.17.

Таблиця 3.8 – Набір адаптованих коефіцієнтів моделі
(Джерело – розроблено автором)

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000231	a_{4M}	-0,00017	a_{7M}	-1,8072
a_{2M}	0	a_{5M}	0,0024736	a_{8M}	0,0033926
a_{3M}	0,0068688	a_{6M}	-0,009773	a_{9M}	0,29731

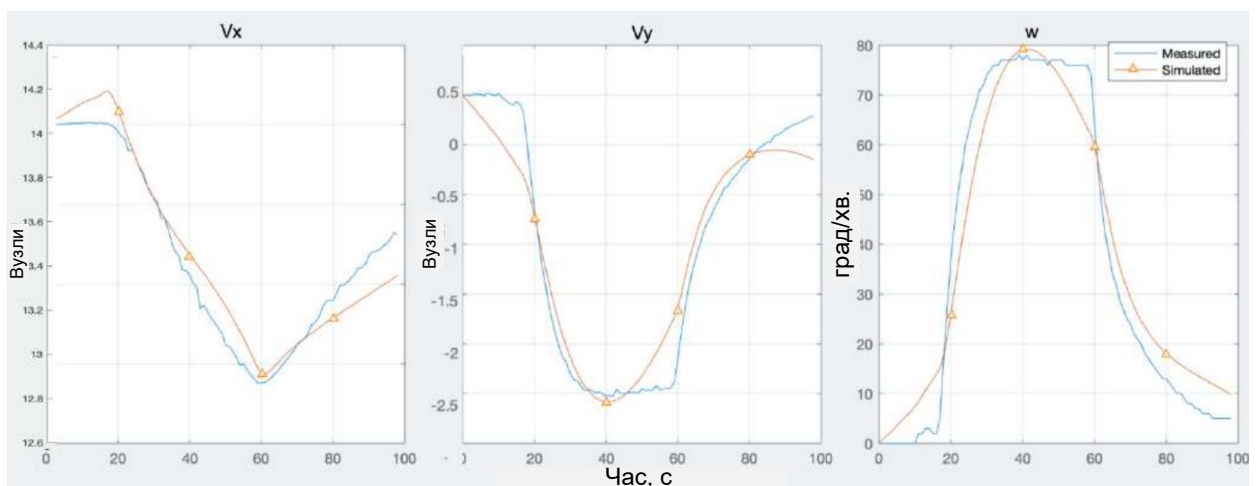


Рисунок 3.17 – Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання з адаптованим набором коефіцієнтів
(Джерело – розроблено автором)

Моделювання виконувалося на комп'ютері із процесором Intel Core I3 1,1 GHz, пікове обчислювальне навантаження процесів адаптації та

моделювання наведено на рис. 3.18.

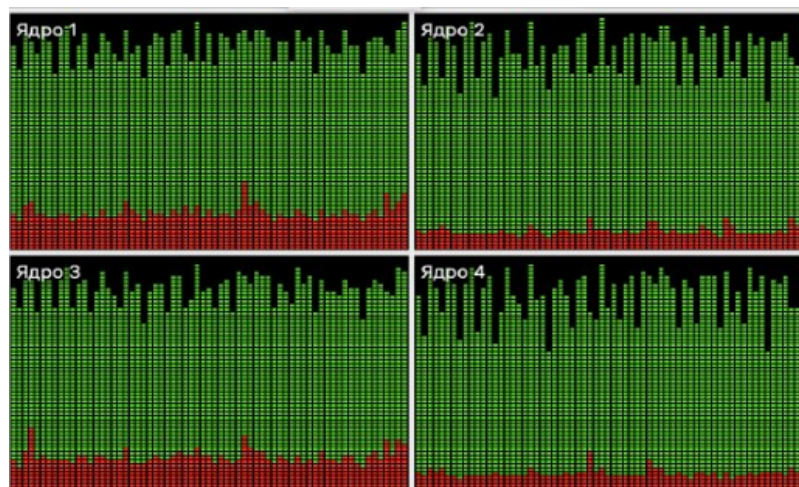


Рисунок 3.18 – Навантаження процесора під час моделювання руху судна
(Джерело – розроблено автором)

Висновки до розділу 3

1. Виконана структурна ідентифікація динамічної системи управління судном, визначено кореляційні залежності між вхідними та вихідними параметрами такої системи. Виконано параметричну ідентифікацію лінійних та нелінійних моделей руху судна, здійснено порівняльний аналіз якості ідентифікації. Запропоновано метод адаптивної ідентифікації моделі руху судна за поточними вимірами.

2. Результати проведених досліджень свідчать, що дана адаптивна модель руху судна (3.5) відповідає основним законам гідромеханіки та разом з алгоритмом адаптації (3.22)-(3.24) може бути використана як базова при синтезі адаптивного методу управління рухом судна.

3. Час, який витрачається на адаптацію такої моделі, а також необхідність мати весь часовий ряд вимірних параметрів руху судна під час виконання маневру вимагає застосування комп'ютера з достатньо високою продуктивністю за безпосереднього використання алгоритму (3.22)-(3.24) у САУ судна під час здійснення ним маневрування на мілководді.

4. Удосконалено адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

Основні результати, отримані у розділі 2, опубліковані у роботах здобувача [79].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ РУХУ СУДНА ПРИ МАНЕВРУВАННІ У СТИСНУТИХ ВОДАХ

Розділ дисертаційної роботи присвячений практичному застосуванню знання-орієнтованих методів підтримки маневрування у стиснутих водах шляхом побудови штучних нейронних мереж (ШНМ). Проводиться формування набору вихідних даних для навчання штучної нейронної мережі, тестується відповідна мережа, оцінюється її працездатність для використання у знання-орієнтованій системі підтримки прийняття рішення судноводіння.

4.1 Формування набору навчальних даних для прогнозування динаміки руху судна при маневруванні у стиснутих водах

Перед навчанням нейронних мереж необхідно сформувати набір вхідних і вихідних зразків даних. Зазначений набір навчальних даних повинен задовольняти таким умовам:

- 1) зразки навчальної й тестової вибірок повинні суттєво відрізнятися один від одного;
- 2) кількість повинна бути достатньою для настроювання нейронної (нейро-нечіткої) системи;
- 3) повинна бути передбачена можливість отримання зразків у ході натурних випробувань.

Підхід щодо формування навчальної вибірки, що задовольняє першим двом умовам, розглянутий у [52, 54, 55]. Він полягає в такому. Вектор величин, на основі яких обчислюється вхід нейронної мережі, являє собою псевдовипадкову функцію часу. Компоненти вектору формуються з використанням датчиків випадкових чисел. Зазначений вектор подається на

вихід імітаційної моделі, на основі якої, у свою чергу, обчислюються вихідні показники маневрування судна у стиснутих водах.

Зазначений метод отримання зразків застосуємо тільки в тому випадку, коли при формуванні еталонних ситуацій використовується та або інша імітаційна модель руху судна. Дійсно, важко представити таку ситуацію, коли, наприклад, в один момент часу швидкість відносного вітру в акваторії дорівнює 20 м/с, а в наступний момент часу вже приймає значення 0,1 м/с. Отже, необхідно розробити алгоритм, який працює безпосередньо з реальними даними.

Опишемо перший спосіб отримання зразків, який умовно називається методом варіацій управляючих впливів. Метод формування зразків записується в такий спосіб:

1) для всякої модельної ситуації тривалістю $t_{пл}$ задаються постійними з використанням генераторів псевдовипадкових чисел рівномірного розподілу:

- швидкість дійсного вітру (15-20 м/с);
- напрямок дійсного вітру (0-360°);
- висота хвилі (від 5 до 6 м);
- довжина хвилі (від 140 до 160 м);
- напрямок поширення хвиль (від 0 до 360°);
- початковий курс (0-360° або останнє значення з попередньої ситуації);
- початкова поздовжня швидкість (від 0 до найбільшого можливого значення в заданих умовах або останнє значення з попередньої ситуації);
- початкова поперечна швидкість (0 або останнє значення з попередньої ситуації);
- початкова кутова швидкість (0 або останнє значення з попередньої ситуації);
- кут перекладки керма (від -35° до +35°);
- частота обертання гвинта (0-найбільше номінальне значення n_{max} , об/хв.);
- тип акваторії (h/T);
- тип дна акваторії;

2) на основі заданих величин визначаються вхідні зразки і фіксуються вихідні;

3) пункти 1-2 повторюються на всякій ітерації наступного циклу, коли кут перекладки керма δ і частота обертання гвинта n витримуються постійними протягом часу $t_{пл}$;

4) пункти 1-3 повторюються два рази: спочатку для $d_\delta = 5^\circ, d_n = n_{max}/(10 - 1)$ формується набір навчальних даних, а для другого разу ($d_\delta = 7^\circ, d_n = n_{max}/(7 - 1)$) виходить набір тестових даних.

Блок-схема алгоритму представлено на рисунку 4.1.

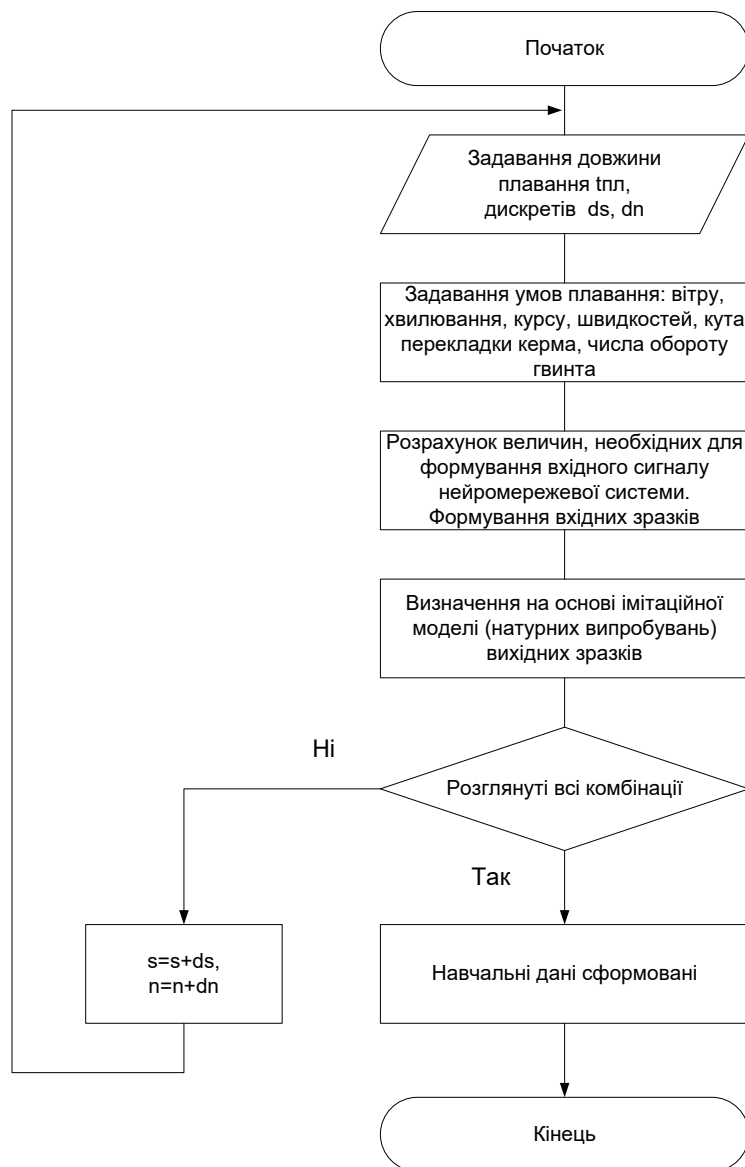


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму варіацій управляючих впливів
(Джерело – розроблено автором)

Алгоритм може бути реалізований не тільки безперервним варіюванням управляючих впливів, але й розглядом кожної модельної ситуації окремо. Наприклад, в один день може бути розглянута одна модельна ситуація (комбінація δ та n), а через кілька днів інша. При роздільному розгляді модельних ситуацій необхідно, у загальному випадку, враховувати часовий взаємозв'язок величин, що формують вхідні сигнали.

Запропонований метод може бути розширений шляхом введення змінних границь для величин, що характеризують інтенсивність зовнішніх факторів, які відповідають зовнішнім циклам за зазначеними границями.

На основі описаного алгоритму формуються вектори вхідних та вихідних зразків, які пред'являються для навчання відповідних нейронних мереж, а також гібридних систем.

При реалізації методу варіацій управляючих впливів залишаються невирішеними низка питань. Одне з них ставиться до вибору тривалості плавання $t_{пл}$ у кожній модельній ситуації. Інша проблема пов'язана з вибором дискретностей d_δ d_n , з яких відбувається варіювання величин управляючих впливів. Вибір зазначених кількісних параметрів визначає кількість та якість зразків, від яких залежить успішність процесу навчання нейронної мережі. Нарешті, підлягає дослідженню питання про те, які гідрометеорологічні умови повинні спостерігатися на акваторії, і які повинні бути співвідношення між кількісними величинами, що їх характеризують.

Спосіб варіацій управляючих впливів для формування набору навчальних даних ШНМ дозволяє зібрати достатню кількість різних зразків, але потребує проведення спеціальних натурних випробувань. Під час їх проведення судно повинно зробити досить багато окремих маневрів, які неможливо провести в процесі його нормальної експлуатації, що приводить до додаткових витрат. Тому необхідно створити альтернативні методи, за допомогою яких формується необхідний набір навчальних даних.

По мірі руху судна набір величин, який характеризує його рух при маневруванні у стиснутих водах і на основі якого можуть бути сформовані

навчальні дані, постійно змінюється. Як наслідок, змінюється й кінематика судна. З усього множинного набору можливих значень зразків можна виділити класи схожих умов маневрування, у кожному з яких вплив вхідних зразків на рух судна можна вважати приблизно еквівалентним. Це наводить на ідею розробки методу формування зразків, що накопичуються з часом, при русі судна без проведення спеціальних випробувань.

Використаємо цей метод для умов поточної експлуатації судна. Основна проблема в реалізації даного методу полягає в класифікації вхідного сигналу. При правильному виборі пари «вхід»-«вихід» для конкретної системи вихідний сигнал повинен однозначно визначатися значеннями компонентів вхідного вектору. Отже, основною метою класифікації є розгляд зразків кожного класу, за можливістю, більш повно охопивши простір можливих значень вхідного вектору.

Нехай N_I – кількість компонентів вхідного сигналу нейронної мережі, кожна з яких може бути охарактеризована N_C класами її можливих значень. Тобто, N_C є кількість проміжків, що формують множину можливих значень вхідної величини. Потрапляння вхідної величини в один з даних проміжків означає приналежність її певному класу. Неможливість розглянути всі можливі значення вектору вхідного сигналу вимагає розгляду комбінації приналежностей його компонент тому або іншому класу.

При такому підході до класифікації навігаційних ситуацій у стиснутих модах можливі $N_{\text{class}} = N_C^{N_I}$ класів векторів вхідного сигналу. Для ШНМ, що приймає на вході 6 сигналів, кожний з яких характеризується 5-ма класами, значення $N_C^{N_I} = 5^5$ дорівнює 15 625. При десяти вхідних сигналах кількість можливих класів складає $N_C^{N_I} = 5^{10} = 9\,765\,625$. Отже, основна проблема класифікації полягає у великій розмірності навігаційних ситуацій, які мають бути отримані на основі проведення натурних експериментів.

Іншою проблемою є вибір кількості можливих проміжків N_C (та їх границь) для кожного компонента вхідного сигналу. Проміжки визначаються

індивідуально, враховуючи різний вплив різних факторів на рух судна. Навіть для одного класу N_C вибирається найменше з мінімально допустимих значень для всіх компонентів. Зазначені допустимі значення визначаються на основі значної кількості експериментальних даних. Таким чином, кількість можливих класів повинна бути достатньою для представлення основних комбінацій можливих значень вхідного вектору, з одного боку, але не занадто великою для зібрання експериментальних даних за певний час, з іншого.

Метод поточної експлуатації частково реалізований при формуванні навчальних даних для створення бази правил нечіткої системи і настроюванні нечітких нейронних мереж. Даний метод не формує тестову множину, зразки якої повинні бути відмінними від зразків навчальної множини.

Поступовий збір даних у просторі можливих значень вхідного вектору визначає ефективність методу поточної експлуатації для тестування синтезованих нейронних (гібридних) систем. Висновок про працездатність системи може бути зроблений після розгляду тестових зразків усіх класів.

На формування набору навчальних даних для навчання нейронної мережі впливає не тільки якість, але й кількість N зразків. Про це йде мова у [55], де наводяться рекомендації з визначення необхідної кількості зразків:

$$N \geq \frac{W}{e}, \quad (4.1)$$

де W – кількість вільних коефіцієнтів нейронної мережі (вагових коефіцієнтів і граничних значень); e – частка помилок, що допускаються при тестуванні.

Правило (4.1) враховується при формуванні наборів зразків для настроювання конкретних систем.

Розглянутий алгоритм формування зразків, використовуваний для навчання нейронних мереж (гібридних систем) й орієнтований на проведення натурних спостережень, фактично дозволяє проводити ці самі спостереження.

Навчання нейронних мереж (гібридних систем), виконане на основі отриманих з використанням зазначеного способу даних, дозволяє ідентифікувати модель руху судна при маневруванні у стиснутих водах. Коефіцієнти ШНМ залежать від фізичних характеристик (властивостей) судна.

Прогнозування руху судна також може виконуватися на основі повних вимірів, коли вимірюються обидві складові швидкості (прискорення) судна. Тоді синтезована нейронна мережа є універсальною моделлю зчислення для всіх суден, а необхідна кількість зразків визначається процедурами моделювання.

Технологія отримання набору навчальних даних для систем такого типу може бути представлена у вигляді такого алгоритму (рисунк 4.2):

- 1) задання часової дискретності моделі Δt , довжини навчальної вибірки (кількості зразків); задання границь можливих значень компонент початкового і вихідного векторів та їх дискретності; алгоритму чисельного інтегрування;
- 2) формування дискретної множини вихідного вектору.
- 3) вибір елементів із зазначеної в п. 2 множини у кожний момент дискретного часу за допомогою датчиків випадкових чисел;
- 4) визначення вихідного сигналу нейронної мережі шляхом чисельного інтегрування;
- 5) повторення пунктів 2-4, поки вихідний вектор не прийме значення у встановлених межах на всій вибірці (тобто для кожного моменту часу).

Для утримання вихідного сигналу мережі у заданих межах для компонентів початкового сигналу в сусідні моменти часу встановлюються обмеження такого вигляду:

- за знаком (будь-які два вхідні вектори, що послідовно йдуть, повинні мати компоненти з різними знаками у межах кожного рядка). Так, якщо в момент часу 10 с північна складова прискорення дорівнює $0,3 \text{ м/с}^2$, то в наступний момент часу (11 с) вона може бути тільки негативною, наприклад, $-0,2 \text{ м/с}^2$;
- за максимально допустимим модулем різниці їх модулів Δ (для відповідних компонент повинен перебувати у встановлених межах).



Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму формування навчальних даних систем, що моделюють кінематику судна
(Джерело – розроблено автором)

Для формування зразків тестової вибірки необхідно повторити описаний вище алгоритм ще один раз. При цьому зразки тестової вибірки будуть відрізнятися від зразків навчальної вибірки через використання при їхньому формуванні стохастичного механізму.

Параметри зазначеного алгоритму формування набору навчальних даних:

- 1) довжина навчальної вибірки;
- 2) часова дискретність;
- 3) границі вихідного вектору;
- 4) дискретність вихідного вектору;
- 5) границі вихідного вектору;
- 6) значення обмежуючої величини Δ ;
- 7) тип алгоритму чисельного інтегрування.

4.2 Тестування нейромережових (нейро-нечітких) систем для прогнозування динаміки руху судна при маневруванні у стиснутих водах

Після настроювання нейронних мереж виникає необхідність перевірити їхню роботу при поданні на вхід сигналів, не використовуваних у процесі навчання. Рух судна при маневруванні у стиснутих водах є важкопрогнозованим, оскільки характер маршруту та зовнішні умови можуть мати різний ступінь мінливості. Метод тестування повинен врахувати все різноманіття рухів судна.

Можливі навігаційні ситуації (НС) можуть бути об'єднані в три класи, описи яких наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Класи навігаційних ситуацій
(Джерело – розроблено автором)

Номер класу	Характеристика	Правила моделювання навігаційної ситуації
I	ЗВ приблизно постійні, а УВ можуть змінюватися або бути відсутніми (залежно від настроювання авторульового)	ГС постійна. Судно втримується на заданому курсі при постійних оборотах гвинта
II	УВ у середньому постійні в часі, а ЗВ змінюються із часом	ГС постійна або носить змінний характер. Задається число оборотів гвинта й кут перекладки керма, які залишаються незмінними під час плавання судна
III	УВ змінюються, і ЗВ змінюються із часом	ГС постійна або носить змінний характер. Число оборотів гвинта й кут перекладки керма змінюються протягом часу за певним законом

Отримані три класи НС охоплюють основні варіанти руху судна, які можуть відтворюватися в умовах його реальної експлуатації. Для моделювання НС зазначених типів необхідно ще проробити низку питань, актуальних для стадії імітаційного моделювання.

По-перше, для імітації ситуацій першого класу потрібно використовувати систему автоматичної стабілізації судна (авторульовий) на заданому курсі. Як алгоритм авторульового використано ПІД-регулятор, що забезпечує управління за законом (3.24). Для визначення коефіцієнтів контролера для конкретного судна використано рекомендації, описані в [20, 56]

По-друге, для імітації ГС необхідно зробити ряд припущень. Постійний характер ГС допускає, що протягом усього руху її параметри залишаються незмінними в часі й просто вибираються з використанням датчиків випадкових чисел рівномірного розподілу із проміжків (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Проміжки величин, що характеризують гідрометеоситуацію
(Джерело – розроблено автором)

Найменування параметра	Позначення	Одиниці виміру	Границі
Напрямок дійсного вітру	Ktr	°	[0; 360]
Швидкість дійсного вітру	Vtr	м/с	[0; 30]
Напрямок хвилювання (звідки приходять хвилі)	Kw	°	[0; 360]
Довжина хвилі	λ	м	[10; 250]
Висота хвилі	h	м	[0; 10]

Для моделювання регулярного хвилювання використовуються допущення, побудовані на лінійній теорії регулярних хвиль. Передбачається, що крутість хвилі $h/\lambda \leq 0,2$. Дійсний період хвиль дорівнює:

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}},$$

де g – прискорення вільного падіння.

Якщо ГС є змінною, то параметри вітру й хвилювання передбачаються мінливими в часі t як така сума гармонік:

$$x(t) = x_0 + A_1 \sin(2\pi t/\tau_1) + A_2 \sin(2\pi t/\tau_2) + A_3 \sin(2\pi t/\tau_3), \quad (4.2)$$

де x_0 – випадковим чином обране із проміжків можливих значень відповідно до табл. 4.2 середнє значення величини, що моделюється; $A_1, A_2, A_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ – амплітуди й періоди першої, другої і третьої гармонік, відповідно.

Границі можливих значень даних величин наведено в табл. 4.3. При моделюванні з використанням залежності (4.2) значення $x(t)$ повинно перебувати в межах, зазначених у табл. 4.2.

Таблиця 4.3 – Параметри гармонік величин, що характеризують гідрометеорологічну ситуацію
(Джерело – розроблено автором)

Найменування величини	Позначення	Одиниці виміру	I гармоніка		II гармоніка		III гармоніка	
			A	τ	A	τ	A	τ
Модуль дійсного вітру	V_{tr}	м/с	[0;30]	2-10 год	[0;5]	10 хв-1 год	[0;2]	10 с-1 хв
Напрямок дійсного вітру	K_{tr}	°	[0;360]	*)	[0;30]	*)	[0;10]	*)
Висота хвилі	h	м	[0;5]	**)	-	-	-	-
Напрямок хвилювання	K_w	°	[0;90]	***)	-	-	-	-
Довжина хвилі	λ	м	[30;100]	1-10 год	-	-	-	-

*) Період напрямку вітру може відрізнятися для відповідних гармонік від його модуля не більш, ніж відповідно на 1 годину, 1 000 та 30 секунд.

**) Період зміни висоти хвилювання може відрізнятися від періоду зміни першої гармоніки модуля дійсного вітру на величину, що не перевершує по модулю 1 год.

***) Період зміни напрямку хвилювання може відрізнятися від періоду зміни першої гармоніки напрямку дійсного вітру на величину, що не перевершує по модулю 1 год.

Моделювання НС третього класу допускає, що кут перекладки керма й частота обертання гвинта змінюються протягом часу за законом:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= 35^\circ \sin(2\pi t/\tau_\delta), \\ n(t) &= (n_{\max}/2) + (n_{\max}/2) \cdot \sin(2\pi t/\tau_n), \end{aligned} \quad (4.3)$$

де τ_δ – період зміни кута перекладки керма; τ_n – період зміни частоти обертання гвинта.

Їх найменші значення вибираються, виходячи з обмежень рульової машини та рушійно-рульового комплексу (РРК), а найбільші – обрані у подвоєному часі руху.

Алгоритм методу тестування ШНМ прогнозування маневрування суден у стиснутих водах виглядає так (рисунок 4.3):

- 1) задається кількість модельних (навігаційних) ситуацій для кожного із трьох класів, тривалість кожної модельної ситуації;
- 2) моделюються умови руху судна на проміжку часу заданої тривалості (навігаційна ситуація одного із трьох класів).

Умови визначаються:

- параметрами вітру й хвилювання;
 - режимом роботи РРК судна;
 - початковою кінематикою (курс, кутова й лінійна швидкості);
 - взаємодією судна з берегом, дном, іншим судном у стиснутій акваторії;
- 3) визначається траєкторія руху судна на основі імітаційної моделі;
 - 4) визначається траєкторія руху судна на основі ШНМ;
 - 5) визначаються нев'язки між траєкторіями, отриманими у попередніх пунктах алгоритму;
 - 6) пункти 2-5 повторюються, поки не буде розглянута задана кількість модельних (навігаційних) ситуацій кожного класу;
 - 7) визначаються найбільше й середнє значення максимуму модуля нев'язки (за час руху заданої тривалості) у розглянутих модельних ситуаціях.

Розглянутий у даному параграфі метод тестування застосовується для перевірки працездатності ШНМ (нечіткої й гібридних систем), що прогнозують рух судна та його координати. Метод використовує імітаційну модель руху судна в умовах зовнішніх впливів стиснутої акваторії.



Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму тестування нейромережевої (нейро-
нечітких) системи прогнозування динаміки руху судна при маневруванні у
стиснутих водах

(Джерело – розроблено автором)

4.3 Дослідження надійності системи підтримки прийняття рішення судноводінням, побудованої на основі знання-орієнтованих технологій

Визначення координат судна при маневруванні у стиснутих водах для СППР судноводіння здійснюється у дискретні моменти часу. З метою розрахунку показника надійності системи підтримки прийняття рішення, побудованого на знання-орієнтованих технологій проведемо порівняння надійності нейронної мережі прогнозування руху судна при маневруванні в стиснутих водах, що враховує моделі, побудовані у розділі 2 роботи. та системи паралельних (розподілених) обчислень.

При розподілених обчисленнях величини, що формують рівняння руху на мілководді, розраховуються окремо на своєму процесорі. Наприклад, сила, що діє на корпус судна з боку керма, обчислюється на одному обчислювальному вузлі, а сила взаємодії з берегом – на іншому.

Конкретна схема розподілу обчислень визначається кількістю незалежних процесорів, які залучаються до проведення відповідних розрахунків і методиками розрахунків сил, що впливають на корпус судна при його русі в умовах стиснутої акваторії. Розглянемо варіант розподілу обчислень координат руху судна при маневруванні у стиснутих водах. Нехай у системі використовується вісім обчислювальних вузлів. Перші сім з них відповідно до моделей, побудованих у п. 2.2 дисертації, обчислюють сили, що діють на корпус судна, а також величини, що залежать від кінематичних характеристик його руху. Далі результати обчислень надходять на восьмий процесор, що обчислює координати судна при маневруванні у стиснутих водах.

Використання розробленої схеми розподілених обчислень руху судна набуває сенсу, коли потрібно забезпечити не тільки надійність, але й швидкодію системи прогнозу. Насправді, якщо є вісім незалежних процесорів, то існує можливість організувати обчислення правих частин диференціального рівняння на кожному з них. У такому випадку обчислення на кожному процесорі виконуються послідовно, а розроблена система розподілених обчислень дозволяє організувати паралельні обчислення, що

дозволяють, як правило, підвищити продуктивність обчислень при прогнозі координат судна при маневрування у стиснутих водах.

Розроблена схема обчислень допускає використання процесорів різної продуктивності з урахуванням складності конкретної обчислювальної задачі. Наприклад, обчислення величини $-m\omega V_{ox1}$ представляє собою множення трьох дійсних чисел, і для виконання даної операції не потрібує потужного обчислювального вузлу. Для розрахунку сили F_{wy1} , що діє на судно з боку схвильованої поверхні моря у стиснутій акваторії, допускає інтегрування по змоченій поверхні корпусу судна, необхідний потужний процесор.

Іншим шляхом досягнення оптимальності системи розподілених обчислень координат судна при маневруванні є раціональний добір величин, які будуть обчислюватися з використанням процесорів, відповідно до їх продуктивності. Допустимо, що розподілена система прогнозування координат судна при маневруванні у стиснутих водах є оптимальною з позиції швидкодії формуючих її обчислювальних вузлів, а основна увага приділяється дослідженню надійності даної системи.

Аналогічну функцію прогнозу координат судна при маневруванні у стиснутих водах виконує кожна з нейронних мереж. Якщо вхідний шар мережі має 7 нейронів, то кількість обчислювальних вузлів точно дорівнює кількості процесорів розглянутої раніше системи розподілених паралельних обчислень. Отже, дві дані обчислювальні системи будуть еквівалентні з погляду обчислювальних (апаратних) можливостей.

Для прогнозу координат судна вибирається статична нейронна мережа, перший шар якої має 7 нейронів. З цією ж метою використовується й система паралельних обчислень. Нехай у процесі обчислень виходять із ладу будь-які один, два або шість обчислювальних вузлів першого шару.

Рух судна моделюється для трьох класів НС. Розглянуто по 100 модельних ситуацій для кожного варіанту втрати працездатності заданої кількості процесорів. Кожна модельна ситуація являє собою рух судна протягом однієї години. Номера конкретних процесорів (від 1 до 6), які втрачають працездатність, обираються для кожної модельної ситуації випадково.

За показники працездатності систем (за прогнозом координат судна) при порушенні роботи їх окремих обчислювальних вузлів використовуються найбільше (e_{\max}) і середнє (e_{mean}) значення модуля помилки швидкості в тестових модельних ситуаціях. За дійсне значення координат та швидкості руху судна використовується значення, прогнозоване системою у неущкодженому стані, коли використовуються всі їх обчислювальні вузли. Характеристиками прогнозу траєкторії є найбільше (c_{\max}) і середнє (c_{mean}) значення максимуму модуля нев'язки, спостережуваного в тестових модельних ситуаціях. Окремо виділяються постійні гідрометеоумови (ПГМУ) та змінні гідрометеоумови (ЗГМУ). Умови експерименту відповідають умовам, обґрунтованим у дослідженні [108] Результати тестування наведено у додатку Б (табл. Б.1-Б.9).

У таблиці 4.4 наведено порівняння надійності роботи двох систем. Найкращі за точністю значення виділені сірим кольором.

Таблиця 4.4 – Порівняння працездатності двох систем
(джерело – розроблено автором)

Тип системи	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу параметрів руху судна, м						
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
Система розподілених паралельних обчислень	100	e _{max}	12,74	14,21	13,56	13,36	35,10	8,49
		e _{mean}	0,50	1,74	1,93	0,54	2,76	0,61
		c _{max}	14,22	52,95	42,01	43,79	89,22	32,87
		c _{mean}	2,09	10,93	10,97	6,24	14,37	11,87
Нейронна мережа		e _{max}	4,25	4,99	4,54	4,53	4,17	3,23
		e _{mean}	1,04	1,47	1,55	1,37	1,25	0,95
		c _{max}	26,50	29,61	26,26	21,81	24,81	23,96
		c _{mean}	5,51	7,40	7,75	7,39	6,81	5,35

Основні висновки за результатами проведеного дослідження.

Точність прогнозу швидкості й розрахунків координат у системі розподілених паралельних обчислень і в нейронній мережі не монотонно погіршується зі збільшенням кількості вузлів, що вийшли з ладу. Однак, характеристики точності нейронної мережі є більш стабільними до зміни кількості непрацюючих обчислювальних вузлів.

Похибка нейронної мережі залишається практично постійною при будь-яких значеннях кількості процесорів, виключених з обчислень. Система розподілених обчислень характеризується помилками, величина яких суттєво змінюється при зміні кількості непрацюючих вузлів.

Подібні твердження відносяться й до інших характеристик точності прогнозу координат та швидкості, що пояснюється тим, що, на відміну від системи розподілених обчислень, нейромережі приймають сигнали від усіх елементів входу. Як наслідок, це дозволяє вирівнювати, розподіляти навантаження інтенсивних вхідних сигналів, повне ігнорування яких приводить до істотних похибок у даних умовах плавання.

За результатами проведеного експерименту, зазначеним у таблиці 4.9, доведено що точність прогнозу параметрів руху судна, що маневрує у стиснутих водах з використанням знання-орієнтованих технологій вища, ніж при використанні системи розподілених обчислень. Отже, у розглянутих модельних ситуаціях нейронна мережа має більшу обчислювальну надійність у порівнянні з паралельним алгоритмом рішення завдання маневрування.

Порівняння характеру зміни помилок для системи вимірювання координат для нейронної мережі і методу Ейлера, які залежать від характеру інтегрувальної функції, що змінюється від однієї модельної ситуації до іншої, наведені на рис. 4.4.

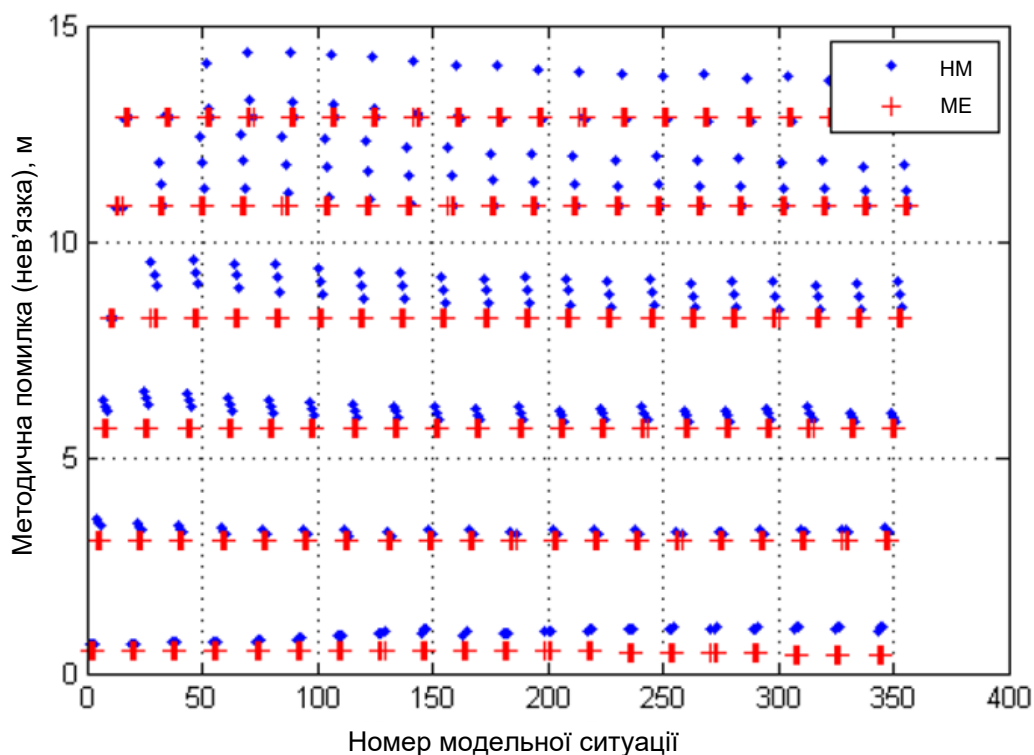


Рисунок 4.4 – Характер зміни методичних помилок нейронної мережі та алгоритму Ейлера. Позначення: НМ – нейронна мережа, МЕ – метод Ейлера (джерело – розроблено автором)

4.4 Оцінка ефективності удосконаленого методу

Спочатку визначають кожен з Q шуканих параметрів управління, які характеризуються своєю значущістю α_k (вага фактору, пріоритетність при прийнятті рішення), оперативністю $P_i(t)$ та достовірністю R_{k_i} (i – значення номера методики). Всі Q параметрів мають однакову величину $P_i(t)$ при обчисленні з використанням того ж самого знання-орієнтованого методу.

Для оцінки значень всіх параметрів до моменту прийняття судноводієм рішення щодо варіанту маневру у стиснутих водах розраховується величина:

$$Y_i(t) = P_i(t) \cdot \sum_{k=1}^Q (\alpha_k \cdot R_{ki}), \quad (4.4)$$

яка приблизно характеризує внесок розглянутого методу у скорочення втрат ефективності за всіма Q параметрам та, таким чином, має зміст ступеня очікуваної повноти для i -го методу, що розглядається.

Узагальнений показник ефективності методу при порівнянні з відомим має вигляд:

$$W(t) = \frac{Y_2(t) - Y_1(t)}{1 - Y_1(t)}, \quad (4.5)$$

де $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ – очікувана повнота врахування значущих факторів при використанні існуючого та розробленого методу, відповідно.

Викладений підхід до порівняльного оцінювання ефективності різних методів апробований при вирішенні практичних завдань і показав свою спроможність давати коректні та задовільні для практики оцінки.

Ймовірність $P_i(t)$, яка по суті визначає оперативність одержання результату при відомих обмеженнях за наявним t_i (тривалість маневру) та потрібним часом T_i (необхідним для вирішення завдань управління судном) на проведення моделювання або розрахунків, визначається так:

$$P_i(t) = 1 - \exp\left(-t_i/T_i\right). \quad (4.6)$$

Основні значущі фактори і параметри Q , які потрібно враховувати при оцінюванні адаптивного методу управління маневруванням судном у стиснутих водах, та їх важливість (вага) α_k наведені у таблиці 4.13.

Урахування факторів у будь-якій методиці (розрахунковій задачі, моделі, методі) здійснюється різноманітними методами їх узагальнення, кожний з яких характеризується своїми методичними похибками та значеннями відносної середньої похибки, що вноситься в розрахунки внаслідок неточного (узагальненого) врахування факторів.

Таблиця 4.13 – Перелік значущих факторів і параметрів для оцінювання адаптивного методу управління маневруванням судном у стиснутих водах

(Джерело – розроблено автором)

№ з/п	Найменування факторів і параметрів, що враховуються в методиках	Вага (α_k)		Способи і варіанти урахування			
		в балах	відносна	розроб. (2)	$\alpha_k \cdot \beta_j$ розроб. (2)	існ. (1)	$\alpha_k \cdot \beta_j$ існ. (1)
1	Вільна поверхня	83	0,0342	ф	0,01521856	н	0
2	Хвильова система	60	0,02472	н	0,0148332	ф	0,011
3	Гідродинаміка мілководдя	100	0,0412	б	0,041203	ф	0,01834
4	Вплив берега	100	0,0412	б	0,041203	ф	0,01834
5	Трасування	68	0,02802	б	0,028018	ф	0,01247
6	Дії гребного гвинта	90	0,03708	н	0,0222498	ф	0,0165
7	Тип судна	91	0,0375	ф	0,01668528	н	0
8	Бокове положення	59	0,02431	ф	0,01081795	ф	0,01082
9	Швидкість	100	0,0412	б	0,041203	б	0,0412
10	Бічна сила на носовому та кормовому перпендикулярі	50	0,0206	б	0,020602	б	0,0206
11	Поздовжня сила	100	0,0412	б	0,041203	б	0,0412
12	Ступені свободи	85	0,03502	ф	0,01558524	ф	0,01559
13	Відстань до берега	82	0,03379	б	0,033787	ф	0,01504
14	Прикордонний шар	64	0,02637	ф	0,01173465	ф	0,01173
15	Глибина води	64	0,02637	б	0,02637	б	0,02637
16	Зазор під кілем	100	0,0412	н	0,0247218	ф	0,01834
17	Відношення глибини води до осадки судна	100	0,0412	н	0,0247218	ф	0,01834
18	Хвилястість поверхні розділу мул-вода	100	0,0412	б	0,041203	ф	0,01834
19	Тип поверхні дна	87	0,03585	н	0,0215082	ф	0,01595
20	Істинний курс	80	0,03296	б	0,032963	б	0,03296
21	Кут дрейфу	60	0,02472	б	0,024722	б	0,02472
22	Відстань від берега	68	0,02802	б	0,028018	ф	0,01247
23	Тип днища судна	42	0,01731	н	0,010383	ф	0,0077
24	Гідродинамічна інерція	57	0,02349	ф	0,01045127	ф	0,01045
25	Бокова сила, викликана дрейфом	100	0,0412	ф	0,01833534	ф	0,01834
26	Бокова сила, викликана ризиканням	100	0,0412	ф	0,01833534	ф	0,01834
27	Тип берега (стілки)	92	0,03791	ф	0,01686862	н	0
28	Реологія мулу	100	0,0412	ф	0,01833534	н	0
29	Наявність та характеристики руху взаємодіючих суден у акваторії	95	0,03914	н	0,0234858	ф	0,01742
30	Інші фактори	50	0,0206	ф	0,00916789	ф	0,00917

врахування: б – безпосереднє, ф – функціональне, н – непряме, п – просте узагальнення

Значення цих похибок істотно залежать від способу узагальнення значущих факторів в інформаційно-розрахунковій задачі.

Значення відносної похибки β_j ($j = 1, 2, 3, 4$), залежно від способу врахування факторів, звичайно знаходиться в таких межах:

$\beta_1 = 1,0$ – при безпосередньому врахуванні фактору шляхом вводу його поточного значення, що відповідає значенню в реальному процесі;

$\beta_2 = 0,6$ – при простому узагальненні (заміні сукупності різноманітних, але однорідних за фізичним змістом факторів одним фактором);

$\beta_3 = 0,445$ – при функціональному та концептуальному узагальненні різнорідних факторів з метою відображення їх у задачі одною представницькою величиною;

$\beta_4 = 0,0$ – при непрямому або неявному врахуванні факторів.

Значення показника повноти врахування впливу стиснутої акваторії на безпеку судноводіння наведено на рис. 4.5.

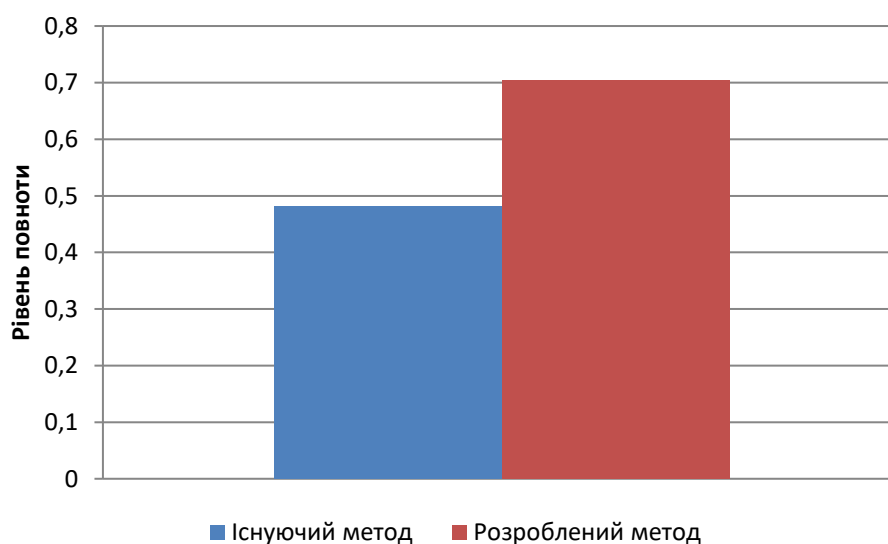


Рисунок 4.5 – Рівень повноти врахування факторів
(Джерело – розроблено автором)

На рис. 4.6 наведено порівняння показників оперативності розробленого (М2) та існуючого (М1) методу.

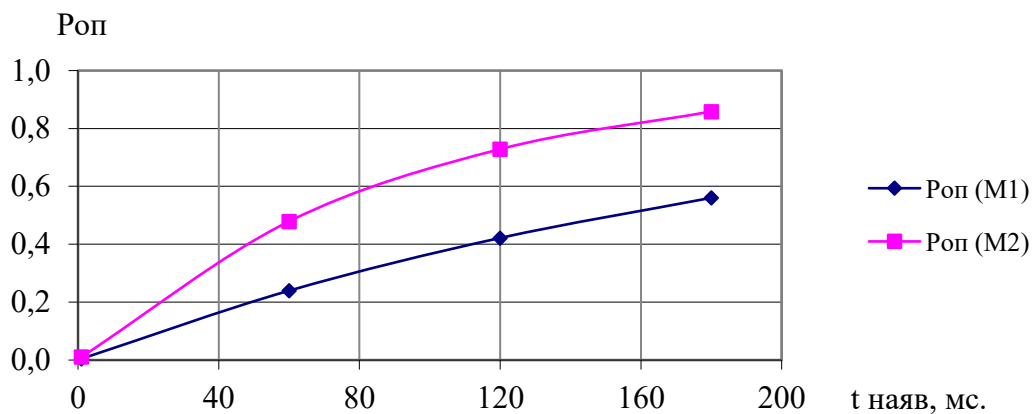


Рисунок 4.6 – Значення показника оперативності $P_{оп}$ методу

На рис. 4.7 наведено порівняння показників повноти розробленого (M2) та існуючого (M1) методу.

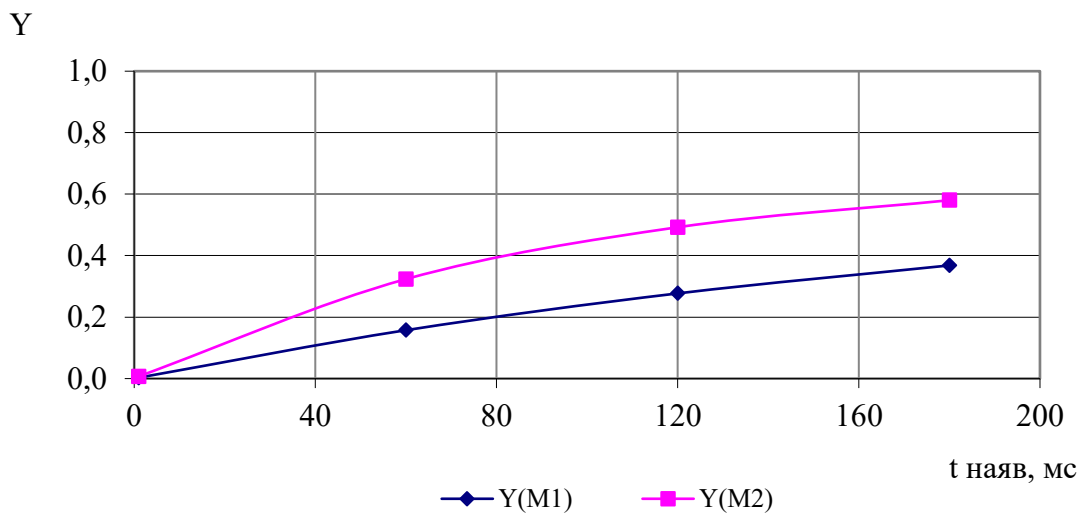


Рисунок 4.7 – Значення показника повноти Y методів
(Джерело – розроблено автором)

Проведені розрахунки узагальненого показника ефективності розробленої методики W для існуючої та розробленої методики при визначеному наявному часі підтверджує перевагу останньої над існуючою (таблиця 4.14).

Таблиця 4.14 – Значення узагальненого показника ефективності розробленої методики при наявному часі, мс (Джерело – розроблено автором)

t (наявний час)	1	60	120	180
W	0,004	0,197	0,298	0,336

На рис. 4.8 наведено значення показника ефективності розробленого методу.

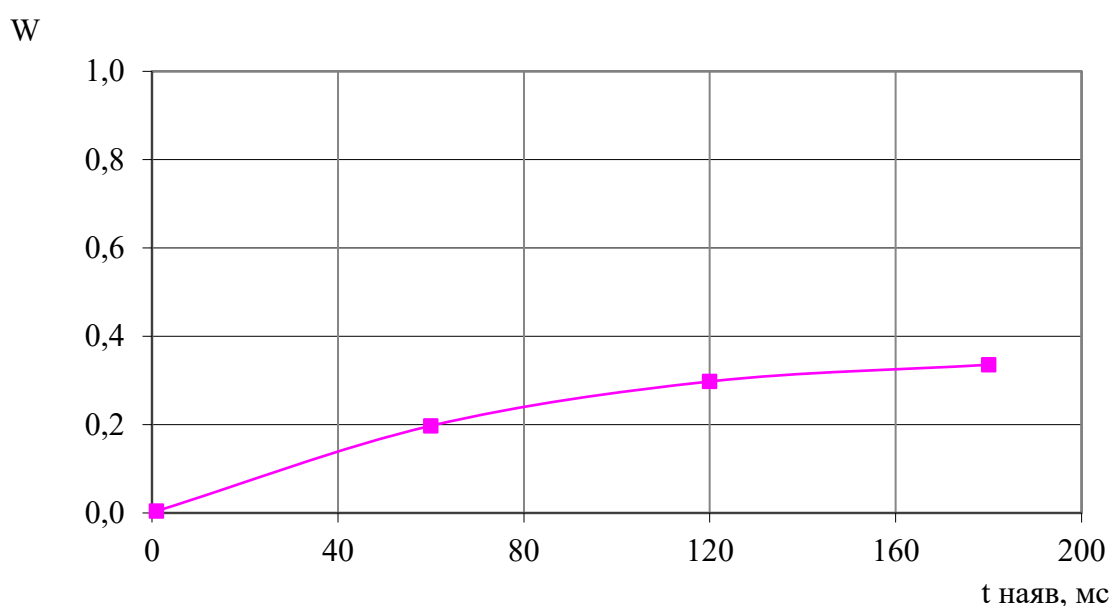


Рисунок 4.8 – Узагальнений показник W ефективності розробленого методу (Джерело – розроблено автором)

Таким чином, оцінка ефективності розробленого методу з використанням відомих в теорії моделювання показників достовірності, оперативності і повноти показує її більшу ефективність (при наявному часі $t_i = 200$ мс на 29,8%) у порівнянні з методами розрахунків, які існують на теперішній час.

Висновки до розділу 4

1. Розроблені алгоритми формування наборів навчальних даних, необхідних для побудови ШНМ (нейро-нечіткої системи) СППР судноводіння у стиснутих водах.

2. Алгоритм формування зразків для настроювання ідентифікуючих судно систем фактично являє собою технологію організації натурних спостережень, у ході яких виходять дані зразки. Для таких систем запропоновано два способи формування навчальних даних – метод варіацій управляючих впливів і метод поточної експлуатації судна. Перший з них допускає проведення великої кількості спеціальних маневрів. Другий – формування зразків за досвідом маневрування у стиснутих водах та його класифікації. Зразки, необхідні для навчання систем, що не виконують функцію ідентифікації моделі руху судна, можуть бути отримані на основі комп'ютерного моделювання.

3. Перевірка працездатності (тестування) знання-орієнтованих систем виконується на основі імітаційного моделювання й має на меті встановити, наскільки адекватні розроблені методи формування зразків та навчання СППР на основі ШНМ.

4. Результати моделювання засвідчили високу навігаційну точність знання-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень при маневруванні у стиснутих водах, коефіцієнти яких не залежать від фізичних характеристик конкретного судна.

5. Результати тестування СППР, побудованої на основі нейронної мережі, що виконує функцію ідентифікації моделі судна, свідчить про прийнятну середню точність нейромережевої системи, а в деяких навігаційних ситуаціях при маневруванні спостерігається істотна розбіжність дійсної й прогнозованих траєкторій.

6. Оцінка ефективності розробленого методу з використанням відомих в теорії моделювання показників достовірності, оперативності і повноти

показує її більшу ефективність (при наявному часі $t_i = 200$ мс на 29,8%) у порівнянні з методами розрахунків, які існують на теперішній час. Застосування розроблених методів дозволяє підвищити своєчасність (оперативність) вироблення рішень порівняно з неавтоматизованим способом на 19–26%. Збільшення кількості чинників, урахованих й оброблених за допомогою запропонованих методів у порівнянні з відомими, дозволяють за наявний час збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 23%.

7. Подальші дослідження в сфері використання нейронних мереж при одержанні зчислених координат місця судна можуть лежати в області розробки технологій одержання зразків, що дозволяють синтезувати високоточні СППР судноводіння.

Основні результати, отримані у розділі, опубліковані у роботах здобувача [75, 77, 78].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано *актуальне наукове завдання* з розробки ефективних знання-орієнтованих методів підтримки маневрування суден у стиснених водах.

1. Результати проведеного аналізу маневрування суден у стиснених водах свідчать про велику кількість факторів, які враховуватиме судноводій при виконанні маневрування, складність самого маневру у стиснених водах і необхідність судноводієві мати відповідні компетенції.

Проблема управління рухом судна за траєкторією у стиснених водах належить до найбільш актуальних, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання та потреби подальшого вдосконалення методів її вирішення. Саме тому гостро стоїть питання якомога швидшого створення систем підтримки прийняття рішення для підвищення безпеки судноводіння, оперативності прийняття рішення та повноти врахування умов маневрування у стиснених водах.

2. Сформульовано підхід щодо створення систем підтримки прийняття рішення для підвищення безпеки судноводіння, який базується на сучасній апаратній складовій обчислювальних комплексів, новітніх інформаційних технологіях, у тому числі знання-орієнтованих моделях і методах, таких як системи штучного інтелекту і штучні нечіткі нейронні мережі.

3. У процесі побудови знання-орієнтованих систем, що забезпечують високоточні повороти судна при маневруванні, були вирішені такі *завдання*:

- визначено залежності між вхідними та вихідними параметрами руху судна, що спостерігаються;
- здійснено ідентифікацію та побудову моделі управління судном на циркуляції;
- здійснено адаптацію ідентифікованої математичної моделі до змінних умов плавання;
- експериментально досліджено еволюції кінематичних параметрів

руху судна один щодо одного на повороті.

4. У ході виконання дисертації отримані такі *нові наукові результати*:

– *удосконалено* модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння;

– *отримала подальший розвиток* модель розходження суден у стиснених водах, яка, на відміну від відомих, враховує гідродинамічну взаємодію між суднами, є елементом системи підтримки прийняття рішень судноводіння та дозволяє підвищити безпеку судноводіння;

– *удосконалено адаптивний метод* управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від відомих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

5. Основні *положення* дисертаційної роботи *реалізовані*

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах використовуються в навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій, факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» (акт № 07/01-11 від 07.01.2025 року);

– модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах, яка враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння. (акт

ТОВ НТЦ Флагман від 19.12.2024 року).

Запропоновані методи і моделі мають високий ступінь готовності до використання і доведені до їх практичної реалізації. Застосування розроблених методів дозволяє підвищити своєчасність (оперативність) вироблення рішень порівняно з неавтоматизованим способом на 19–26%. Збільшення кількості чинників, урахуваних й оброблених за допомогою запропонованих методів у порівнянні з відомими, дозволяють за наявний час збільшити коефіцієнт повноти врахування чинників на 23%. Коректний опис предметної області великою кількістю значущих чинників водночас дозволив підвищити обґрунтованість отриманих рішень.

Отримані в дисертації результати доцільно використовувати при розробці систем підтримки прийняття рішень судноводіння й елементів спеціального математичного та програмного у частині маневрування у стиснених водах та на мілководді; у науково-дослідних організаціях – для дослідження процесів безпеки судноводіння у стиснених водах; у закладах вищої освіти – з метою вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

6. *Значення вирішеного у дисертації завдання для науки* полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ судноводіння у стиснених водах шляхом розробки систем підтримки прийняття рішення судноводіння.

7. *Практичне значення* результатів дослідження полягає у подальшому вдосконаленні знання-орієнтованих моделей і методів системи підтримки прийняття рішення судноводіння, що дозволяють підвищити ефективність та безпеку маневрування у стиснених водах.

8. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано такі *методи дослідження*: методи системного аналізу – для аналізу предметної області та обґрунтування методів управління рухом суден при маневруванні у стиснених водах; методи побудови моделей штучного інтелекту – для розроблення апаратно-програмного комплексу

ідентифікації надводної обстановки; теорія побудови систем підтримки прийняття рішення – для побудови системи підтримки прийняття рішень забезпечення безпеки судноводіння у стиснених водах; методи математичного моделювання – для визначення траєкторій руху суден у стиснених водах; методи теорії ймовірності – для проведення моделювання й оцінювання його результатів під час апробування роботи системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

9. *Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій* підтверджується грамотною постановкою наукового завдання дослідження, комплексним використанням відомих, перевірених практикою теоретичних та емпіричних методів дослідження, а саме методів системного аналізу, математичного моделювання, теорії ймовірності, побудови моделей штучного інтелекту, теорії побудови систем підтримки прийняття рішення на етапах моделювання й аналізу результатів досліджень, збігом отриманих результатів з відомими експериментальними даними у даній предметній області, відкритим обговоренням результатів на наукових семінарах і конференціях і їх публікацією у рекомендованих наукових виданнях, впровадженням результатів дисертаційного дослідження у виробничу діяльність ТОВ НТЦ «Флагман».

10. *Оцінка ефективності* розробленого методу з використанням відомих в теорії моделювання показників достовірності, оперативності і повноти свідчить про її більшу ефективність (при наявному часі $t_i = 200$ мс на 29,8%) у порівнянні з методами розрахунків, які існують на теперішній час.

11. *Перспективними напрямками досліджень* при використанні нейронних мереж для одержання зчислених координат місця судна є розробка технологій одержання зразків для синтезу високоточних СППР судноводіння.

Таким чином, сукупність отриманих нових наукових результатів, їх практична цінність та достовірність дозволяє зробити загальний висновок,

що наукове завдання дисертаційної роботи щодо розробки ефективних знання-орієнтованих методів підтримки маневрування суден у стиснених водах виконано, а мета роботи, яка полягала у підвищенні обґрунтованості та оперативності прийняття рішення судноводієм на маневрування у стиснених водах за рахунок впровадження знання-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень, – досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. PIANC (1997) Approach channels a guide for design. Supplement to PIANC Bulletin 95, 108 pp.
2. Rijkswaterstaat (2011) Waterline Guidelines 2011. Directorate General for Public Works and Water Management.
3. Crane, C.L. (1979) Maneuvering trials of a 278 000-DWT tanker in shallow and deep waters. SNAME Transactions, 87, 251–283.
4. ITTC (2002) The Manoeuvring Committee—Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. Proceedings of the 23rd ITTC, Vol. I, pp. 153–234.
5. Norrbin, N. (1985) Bank clearance and optimal section shape for ship canals. 26th PIANC International Navigation Congress, Brussels, Section 1, Subject 1, pp. 167–178.
6. Yasukawa, H. and Kobayashi, E. (1995) Shallow Water Model Experiments on Ship Turning Performance. Mini Symposium on Ship Manoeuvrability, 26 May 1995, Fukuoka, Japan, pp. 71–83.
7. Lataire, E. and Vantorre, M. (2008) Ship–Bank Interaction Induced by Irregular Bank Geometries. Proceedings 27th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul.
8. Lataire, E. (2014) Experiment based mathematical modelling of ship–bank interaction. Ph.D. thesis, Ghent University.
9. Briggs, M., Vantorre, M., Uliczka, K., and Debaillon, P. (2009) Prediction of squat for underkeel clearance, in Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. Y.C. Kim), World Scientific, Singapore.
10. Vantorre, M., Laforce, E., and Delefortrie, G. (2006) A novel methodology for revision of the nautical bottom, in Seminar: Flanders, a Maritime Region of Knowledge (MAREDFlow) (eds Y. Peeters, N. Fockedey, J. Seys, and J. Mees), Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ), Oostende, pp. 15–34.
11. Вагущенко, Л. Л. Системы автоматического управления движением

судна [Текст]/ Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.

12. Васьков, А. С. Перспективные технологии управления процессами судовождения [Текст]/ А. С. Васьков, А. А. Мироненко // AFES 2005. The sixth international scientific forum AIMS for future of engineering science. March 23 – 30, 2005. – Hong Kong. – С. 72 – 73.

13. Annex 6. Resolution MSC. 137(76). Standards for ship maneuverability. The Maritime Safety Committee, 2002. – 6 p.

14. Yodegord, V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models [Text]/ Master of Science in Engineering Cybernetics. // Norwegian University of Science and Technology. – 2009. – 100 p.

15. Васьков А. С. Прогнозування та контроль руху судна [Текст]/ А. С. Васьков, А. А. Грищенко // Морські інтелектуальні технології. - 2019. – № 1(43). - Т.2. - С. 92 - 96.

16. Bowditch, N. American Practical Navigator [Text]. – Bethesda, Maryland: National imagery and mapping agency, 1995. – 882 p.

17. Гайдук, А. Р. Адаптивні системи управління [Текст] / А. Р. Гайдук, Є. А. Плаксієнко. - К: НАУ. - 120 с.

18. MSC/Circ. 1053. Explanatory notes to the standards for ship maneuverability. – London: International Maritime Organization, 2002. – 41 p.

19. Штанько, А. Н. Дослідження взаємної зміни елементів повороту судна [Текст] / А. Н. Штанько, В. Г. Мельник // Експлуатація морського транспорту. - 2018. - № 3 (88). - С. 44 - 48.

20. Штанько, А. Н. Адаптивна модель руху судна у системах управління [Текст] / А. С. Васьков, А. Н. Штанько // Морські інтелектуальні технології. - 2022. - № 3 частина 1. - С. 288 – 295.

21. Васьков, А. С. Проблеми контролю повороту судна [Текст]/А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Експлуатація морського транспорту. - 2011. - № 3 (65). - С.17 - 20.

22. Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J,

Vogt W (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach.

23. Мальцев, А. С. Информационно-управляющая система учета динамики судна при маневрировании [Текст]: Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. (05.22.16). – Одесса, 1997. – 376 с.

24. Perez T., Blanke M. Mathematical Ship Modeling for Control Applications, Technical Report, The University of Newcastle, Australia and Technical University of Denmark, Lyngby, 2005. – 22 p.

25. Numerical Ship Hydrodynamics: An assessment of the Gothenberg 2010 Workshop / Lars Larsson, Frederick Stern, Michel Visonneau – Springer, 2014. – 324 p.

26. Tsou, M.C., Kao, S.L., Su, C.M., Decision support from genetic algorithm for ship collision avoidance route planning and alerts // The Journal of Navigation. – 2010. –Vol. 63, No. 1. – Pp. 1-16.

27. Yodegord, V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models [Text]/ Master of Science in Engineering Cybernetics. // Norwegian University of Science and Technology. – 2009. – 100 p

28. Vantorre, M., Laforce, E., and Delefortrie, G. (2006) A novel methodology for revision of the nautical bottom, in Seminar: Flanders, a Maritime Region of Knowledge (MAREDFlow) (eds Y. Peeters, N. Fockedey, J. Seys, and J. Mees), Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ), Oostende, pp. 15–34.

29. Verwilligen, J., Vantorre, M., Delefortrie, G., Kamphuis, J., Meinsma, R., and Van Der Made, K.-J. (2014) Manoeuvrability in Proximity of Nautical Bottom in the Harbour of Delfzijl, PIANC World Congress, San Francisco.

30. Ham, D.; Park, H.; Hwang, S.; Kim, K. Neuromorphic electronics based on copying and pasting the brain. Nat. Electron. 2021, 4, 635–644

31. Ren, Z.; Zhen, X.; Jiang, Z.; Gao, Z.; Li, Y.; Shi, W. Underactuated control and analysis of single blade installation using a jackup installation vessel and active tugger line force control. Mar. Struct. 2023, 88, 103338.

32. Chansarkar, M. Neural Networks in GPS Navigation. GPS Solut. 2000, 4, 14–18.
33. Mosavi, M.R. Precise Real-Time Positioning with a Low Cost GPS Engine using Neural Networks. Int. J. Surv. Rev. 2007, 39, 316–327.
34. Jwo, D.J.; Pai, C.-F. Incorporation of Neural Network State Estimator for GPS Attitude Determination. J. Navig. 2014, 57, 117–134.
35. Dand, I.W. (1995) Interaction. Squat, Interaction, Manoeuvring, The Nautical Institute, Humberside Branch Seminar, pp. 1–20.
36. Van Der Molen, W., Swiegers, P., Moes, J., and Vantorre, M. (2011) Calculation of Forces on Moored Ships due to Passing Ships. Second International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Trondheim, Norway, R.I.N.A., pp. 369–374.
37. Talstra, H. and Blik, A.J. (2014) Loads on Moored Ships Due to Passing Ships in a Straight Harbour Channel, PIANC World Congress, San Francisco, USA.
38. Skejic, R. and Berg, T.E. (2009) Hydrodynamic Interaction Effects during Lightering Operation in Calm Water—Theoretical Aspects. MARSIM '09 Conference, Proceedings, Panama City, Panama, Panama Canal Authority, International Marine Simulator Forum, pp. M-8-1–M-8-9.
39. Lataire, E., Vantorre, M., Delefortrie, G., and Candries, M. (2012) Mathematical modelling of forces acting on ships during lightering operations. Ocean Engineering, 55, 101–115.
40. Isermann, R. Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications / R. Isermann, M. Munchhof. – Darmstadt, Germany: Springer, 2010. – 710 p.
41. Гайдук, А. Р. Адаптивні системи управління [Текст] / А. Р. Гайдук, Є. А. Плаксієнко. - К: НАУ. - 120 с.
42. Moreno-Salinas, D. Identification of a Surface Marine Vessel Using LS-SVM [Text]/ Journal of Applied Mathematics. – 2013. – Article ID 8909170 – 11 p.
43. Медведєв М.Г. Теорія ймовірності та математична статистика. К.:

Ліра-К. – 2017. – 543 с.

44. М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.

45. Ділігенська, А. Н. Ідентифікація об'єктів управління [Текст]. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2009. - 136 с.

46 . Isermann, R. Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications / R. Isermann, M. Munchhof. – Darmstadt, Germany: Springer, 2010. – 710 p.

47. Luo, W. Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification [Text]/ Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Article ID 8909170 – 10 p.

48. Mironenko, A. Determining and tracking the programmed trajectory of a vessel [Text]/ A. Mironenko, A. Vaskov// Humanities & Science University Journal.– 2015. – № 13. – pp.74 – 87.

48. Панкратова, Н. Д. Квазіоптимальне згладжування як інструментарій аналізу складних слабоструктурованих динамічних процесів [Текст]/ Н. Д. Панкратова, Д. Г. Стрелков // Кібернетика та системний аналіз. - 2009. - № 6. - С. 79 - 87.

49. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models// Norwegian University of Science and Technology, 2009. P. 100–107.

50. Zan Y. Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink // Open Mechanical Engineering Journal. 2014.Vol. 8. Pp. 820–827.

51. Haykin S. Neural networks. A comprehensive foundations. McMillan College Publ.Co. N.Y., 1994. 696 pp.

52. Нейронні мережі : теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с. ISBN 978-966-995-189-2

53. Schmidhuber, J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview // Neural Networks. – 2015. – Vol. 61. – P. 85–117.

54. Субботін, С. О. Нейронні мережі : навчальний посібник / С. О. Субботін, А. О. Олійник ; під заг. ред. проф. С. О. Субботіна. – Запоріжжя :

ЗНТУ, 2014. – 132 с.

55. Руденко, О. Г. Штучні нейронні мережі / О. Г. Руденко, Є. В. Бодянський. – Харків : Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.

56. Вильский Г.Б. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов/ Вильский Г.Б., Мальцев А.С., Бездольный В.В., Гончаров Е.И. – Одесса.: Феникс, 2007. – 330 с.

57. Artyszuk, J. A novel method of ship maneuvering model identification from sea trials [Text]/ Annual of navigation. – 2003. – № 6. – pp. 19 – 35.

58. MSC/Circ. 1053. Explanatory notes to the standards for ship maneuverability. – London: International Maritime Organization, 2002. – 41 p.

59. Lecue M, Darbra RM. Accidents in European ports involving chemical substances: Characteristics and trends. Safety Science. 2019;115:278–84.

60. Згуровський М.З. Основи системного аналізу / М.З. Згуровський Н.Д. Панкратова. – К. Вид. група BHV, 2007. – 546 с.

61. Макс Тегмарк. Життя 3.0.: доба штучного інтелекту. – Київ: Наш формат, 2019. — 432 с.

62. Даки О.А., Дорошева А.О., Іваненко В.М., Чебан В.І. Агентоорієнтована модель реалізації системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 3(63). С. 122-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>.

63. Мельник О.В., Шапран Ю.Є., Матюхов А.Т., Бойко О.А. Дослідження системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння / Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(32). 2021.

64. J Hadi1, Z Y Tay1, D Konovessis. Ship Navigation and Fuel Profiling based on Noon Report using Neural Network Generative Modeling / Article in Journal of Physics Conference Series. July 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2311/1/012005.

65. Ларін О. О. Комп'ютерне та математичне моделювання в задачах прогнозування надійності при поступових відмовах : монографія / О. О. Ларін, О. О. Водка, К. Є. Потопальська ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-

т". – Харків : Юрайт, 2020. – 232 с.

66. Моделювання складних систем : Монографія / За заг.ред. Соловйова В.М. - Черкаси: Брама, видавець Третьяков О. М., 2015. - 354 с.

67. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей. – Київ : ВПЦ Київський університет, 2010. — 464 с.

68. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінет міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р.

69. Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 № 1307.

70. «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» № ДР 0120U104335.

71. Розробка методів запобігання зіткнення суден для підвищення безпеки судноплавства на основі формалізації навігаційних ситуацій № ДР (РК) 0119U103754.

72. Фуклев О.І, Нікітін П.В., Шапіро Г.В. Дослідження особливості маломірного судна та системи управління його рухом// Дніпровські читання-2022: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 8 грудня 2022 р., м. Київ, 2022. С. 66-71.

73. Фуклев О.І., Гороховська О.К. Знання-орієнтовані моделі та методи систем підтримки прийняття рішення судноводіння// Дніпровські читання-2024: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 5 грудня 2024 р., м. Київ, 2024. С. 58-61.

74. Pollalis, C., Boulougouris, E., Turan, O., and Incecik, A. (2016), "ELIGMOS: Time Domain Simulation of the Manoeuvring of Ships in Deep and Shallow Waters," Proc. International Conference on Maritime Safety and Operations, Glasgow, UK, 211-216.

75. Фуклев О., Вечурко О. Знання-орієнтовані технології прийняття рішень під час руху суден у стиснених водах. *Вісник приазовського*

державного технічного університету. 2024. Т. 2, № 49. С. 178–185.
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321392>

76. Furukawa, Y., Ibaragi, H., Nakiri, Y., and Kijima, K. (2016). “Shallow Water Effects on Longitudinal Components of Hydrodynamic Derivatives,” Proc. 4th MASHCON, Hamburg, Germany, 295-303.

77. Фуклев О., Маслов І. Дослідження моделі та методи розрахунку гідродинаміки судна на хвилюванні. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2022. № 2(36). С. 150–165.

78. Фуклев О., Євтушенко М. Моделі розходження суден у стиснених водах. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2024. № 3 (41). С. 159–166.
 doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.18
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/381/337>

79. Фуклев О., Ярмач В. Метод управління маневруванням судна на мілководді. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. № 1(42). С. 147–155.
 doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.18

80. Karatas, G.B.; Karagoz, P.; Ayran, O. Trajectory pattern extraction and anomaly detection for maritime vessels. *Internet Things* 2021, 16, 100436.

81. Zhang, C.; Bin, J.; Wang, W.; Peng, X.; Wang, R.; Halldearn, R.; Liu, Z. AIS data driven general vessel destination prediction: A random forest based approach. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2020, 118

82. Abebe, M.; Shin, Y.; Noh, Y.; Lee, S.; Lee, I. Machine Learning Approaches for Ship Speed Prediction towards Energy Efficient Shipping. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2325.

83. Perera, L.P.; Oliveira, P.; Soares, C.G. Maritime Traffic Monitoring Based on Vessel Detection, Tracking, State Estimation, and Trajectory Prediction. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2012, 13, 1188–1200.

84. Liu, Y.; Liu, W.; Song, R.; Bucknall, R. Predictive navigation of

unmanned surface vehicles in a dynamic maritime environment when using the fast marching method. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 2015, 31, 464–488.

85. Xie, Y.; Zhang, Y.; Ye, Z. Short-Term Traffic Volume Forecasting Using Kalman Filter with Discrete Wavelet Decomposition. *Comput. -Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2007, 22, 326–334.

86. Jaskólski, K. Automatic Identification System (AIS) Dynamic Data Estimation Based on Discrete Kalman Filter (KF) Algorithm. *Sci. J. Pol. Nav. Acad.* 2017, 211, 71–87.

87. Murray, B.; Perera, L.P. Ship behavior prediction via trajectory extraction-based clustering for maritime situation awareness. *J. Ocean Eng. Sci.* 2022, 7, 1–13.

88. Zheng, Y.; Zhang, X.; Shang, Z.; Guo, S.; Du, Y.; Dolezel, P. A Decision-Making Method for Ship Collision Avoidance Based on Improved Cultural Particle Swarm. *J. Adv. Transp.* 2021, 2021, 8898507.

89. Liu, C.; Guo, S.; Feng, Y.; Hong, F.; Huang, H.; Guo, Z. L-VTP: Long-Term Vessel Trajectory Prediction Based on Multi-Source Data Analysis. *Sensors* 2019, 19, 4365.

90. Hexeberg, S.; Flåten, A.L.; Eriksen, B.-O.H.; Brekke, E.F. AIS-based vessel trajectory prediction. In *Proceedings of the 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, Xi'an, China, 10–13 July 2017; pp. 1–8.

91. Miller, A.; Walczak, S. Maritime Autonomous Surface Ship's Path Approximation Using Bézier Curves. *Symmetry* 2020, 12, 1704.

92. Xie, S.; Chu, X.; Zheng, M.; Liu, C. Ship predictive collision avoidance method based on an improved beetle antennae search algorithm. *Ocean Eng.* 2019, 192, 106542.

93. Lu, B.; Lin, R.; Zou, H. A Novel CNN-LSTM Method for Ship Trajectory Prediction. In *Proceedings of the 2021 IEEE 23rd IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC-2021)*; Haikou, China, 17–19 December 2021; pp. 2431–2436.

94. Murray, B.; Perera, L.P. An AIS-based deep learning framework for

regional ship behavior prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021, 215, 107819.

95. Zhang, Z.; Ni, G.; Xu, Y. Ship Trajectory Prediction based on LSTM Neural Network. In *Proceedings of the 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, IEEE, Chongqing, China, 12–14 June 2020; pp. 1356–1364.

96. Qian, L.; Zheng, Y.; Li, L.; Ma, Y.; Zhou, C.; Zhang, D. A New Method of Inland Water Ship Trajectory Prediction Based on Long Short-Term Memory Network Optimized by Genetic Algorithm. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4073.

97. Wang, S.; Li, Y.; Xing, H. A novel method for ship trajectory prediction in complex scenarios based on spatio-temporal features extraction of AIS data. *Ocean Eng.* 2023, 281, 114846.

98. Ma, H.; Zuo, Y.; Li, T.; Lambert, A. Vessel Navigation Behavior Analysis and Multiple-Trajectory Prediction Model Based on AIS Data. *J. Adv. Transp.* 2022, 2022, 6622862.

99. Venskus, J.; Treigys, P.; Markevičiūtė, J. Unsupervised marine vessel trajectory prediction using LSTM network and wild bootstrap techniques. *Nonlinear Anal. Model. Control* 2021, 26, 718–737.

100. Hammedi, W.; Brik, B.; Senouci, S.M. Toward Optimal MEC-Based Collision Avoidance System for Cooperative Inland Vessels: A Federated Deep Learning Approach. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022, 24, 2525–2537.

101. Ma, J.; Jia, C.; Shu, Y.; Liu, K.; Zhang, Y.; Hu, Y. Intent prediction of vessels in intersection waterway based on learning vessel motion patterns with early observations. *Ocean Eng.* 2021, 232, 109154.

102. Mehri, S.; Alesheikh, A.A.; Basiri, A. A Contextual Hybrid Model for Vessel Movement Prediction. *IEEE Access* 2021, 9, 45600–45613.

103. Chen, X.; Wei, C.; Zhou, G.; Wu, H.; Wang, Z.; Biancardo, S.A. Automatic Identification System (AIS) Data Supported Ship Trajectory Prediction and Analysis via a Deep Learning Model. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1314.

104. Park, J.; Jeong, J.; Park, Y. Ship Trajectory Prediction Based on Bi-LSTM Using Spectral-Clustered AIS Data. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1037.

105. Zhong, C.; Jiang, Z.; Chu, X.; Liu, L. Inland Ship Trajectory Restoration by Recurrent Neural Network. *J. Navig.* 2019, 72, 1359–1377.
106. Gao, M.; Shi, G.; Li, S. Online Prediction of Ship Behavior with Automatic Identification System Sensor Data Using Bidirectional Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network. *Sensors* 2018, 18, 4211.
107. Wang, C.; Fu, Y. Ship Trajectory Prediction Based on Attention in Bidirectional Recurrent Neural Networks. In *Proceedings of the 2020 5th International Conference on Information Science, Computer Technology and Transportation (ISCTT)*, Shenyang, China, 13–15 November 2020; pp. 529–533.
108. Шапіро Г. Дослідження стійкості роботи нейромережі в системі ідентифікації надводної обстановки. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2023. № 47. С. 360-370.
109. Jwo D.-J., Biswal A., Mir I. A. Artificial Neural Networks for Navigation Systems: A Review of Recent Research. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 7. P. 4475. URL: <https://doi.org/10.3390/app13074475>.

ДОДАТОК А

Вихідні дані для оцінювання ефективності розроблених методів

Таблиця А.1 – Розподілені обчислення (за швидкістю) – найбільший модуль похибки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший модуль похибки, м/с					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	2,18	5,28	5,96	2,47	12,44	2,18
II	ПГМУ	50	2,53	8,81	5,84	4,90	15,47	2,91
	ЗГМУ	50	11,48	10,71	12,22	8,95	31,59	7,65
III	ПГМУ	50	12,33	14,18	10,59	13,33	35,03	6,68
	ЗГМУ	50	11,14	12,82	9,57	12,05	31,67	6,04
Підсумок		250	11,21	12,50	11,93	11,76	30,88	7,47

Таблиця А.2 – Розподілені обчислення (за швидкістю) – середній модуль похибки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший модуль похибки, м/с					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	0,37	1,90	1,80	0,52	2,21	0,51
II	ПГМУ	50	0,40	2,15	1,63	0,43	2,36	0,64
	ЗГМУ	50	0,55	1,39	2,18	0,51	3,19	0,50
III	ПГМУ	50	0,59	1,77	1,92	0,73	3,57	0,53
	ЗГМУ	50	0,53	1,60	1,73	0,66	3,23	0,48
Підсумок		250	0,44	1,53	1,70	0,48	2,43	0,54

Таблиця А.3 – Розподілені обчислення (за координатами) – середній максимум нев’язки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший модуль похибки, м/с					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	3,07	12,87	10,49	8,06	20,33	16,99
II	ПГМУ	50	1,32	17,55	11,71	6,42	19,10	11,18
	ЗГМУ	50	1,24	5,44	10,22	2,96	9,41	9,05
III	ПГМУ	50	2,58	8,82	9,82	5,37	11,19	7,35
	ЗГМУ	50	2,34	7,98	8,88	4,85	10,11	6,64
Підсумок		250	1,84	9,62	9,65	5,49	12,64	10,44

Таблиця А.4 – Розподілені обчислення (за координатами) – найбільший максимум нев’язки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший модуль похибки, м					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	13,89	40,14	40,77	23,38	51,03	25,13
II	ПГМУ	50	8,56	52,27	41,47	43,23	88,08	24,78
	ЗГМУ	50	12,50	13,59	22,27	11,30	20,32	26,18
III	ПГМУ	50	13,48	35,33	33,81	18,17	31,52	18,99
	ЗГМУ	50	13,48	35,33	33,81	18,17	31,52	18,99
Підсумок		250	10,11	46,59	36,96	38,53	78,50	28,92

Подібні таблиці з результатами тестування складені й для побудованої штучної нейронної мережі як знанняорієнтованої системи, де не використовується кілька обчислювальних вузлів.

Таблиця А.5 – Нейронна мережа (за швидкістю) – найбільший модуль похибки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший модуль похибки, м/с					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	3,10	4,36	3,38	3,36	3,10	2,80
II	ПГМУ	50	3,46	4,93	3,15	3,73	3,13	3,12
	ЗГМУ	50	2,32	3,63	4,09	3,23	3,20	2,91
III	ПГМУ	50	4,24	4,09	4,28	4,52	3,25	2,99
	ЗГМУ	50	3,83	3,70	3,87	4,09	2,94	2,71
Загальний результат		250	3,74	4,39	3,99	3,99	3,67	2,84

Таблиця А.6 – Нейронна мережа (за швидкістю) – середній модуль похибки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Середній модуль похибки, м/с					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	0,96	1,58	1,35	1,44	1,07	1,00
II	ПГМУ	50	1,13	1,80	1,37	1,27	1,21	1,22
	ЗГМУ	50	0,98	1,28	1,70	1,24	1,04	0,78
III	ПГМУ	50	1,00	1,24	1,57	1,40	1,19	0,85
	ЗГМУ	50	0,90	1,12	1,42	1,26	1,07	0,77
Загальний результат		250	0,92	1,29	1,36	1,21	1,10	0,84

Таблиця А.7 – Нейронна мережа (за координатами) – середній максимум нев'язки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Середній максимум нев'язки, м					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	5,77	9,45	6,95	9,54	5,80	5,74
II	ПГМУ	50	6,40	10,82	7,89	7,28	8,55	9,02
	ЗГМУ	50	4,84	5,07	6,83	5,20	4,32	2,92
III	ПГМУ	50	3,74	4,36	6,71	5,71	4,49	3,30
	ЗГМУ	50	3,38	3,94	6,06	5,16	4,06	2,99
Загальний результат		250	4,85	6,51	6,82	6,50	5,99	4,71

Таблиця А.8 – Нейронна мережа (за координатами) – найбільший максимум нев'язки

Тип навігаційної ситуації		Кількість прогонів моделі	Точність прогнозу швидкості					
			Найбільший максимум нев'язки, м					
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
I		50	17,86	18,26	21,20	21,20	23,32	21,02
II	ПГМУ	50	26,16	29,23	22,07	20,52	23,73	23,65
	ЗГМУ	50	13,08	13,27	17,07	11,64	20,53	12,50
III	ПГМУ	50	11,89	15,64	16,64	15,80	8,56	11,02
	ЗГМУ	50	10,75	14,14	15,04	14,28	7,74	9,96
Загальний результат		250	23,32	26,05	23,11	19,19	21,83	21,08

ДОДАТОК Б

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Фуклєв О., Ярмак В. Метод управління маневруванням судна на мілководді. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. № 1(42). С. 147–155. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.18
2. Фуклєв О., Вечурко О. Знання-орієнтовані технології прийняття рішень під час руху суден у стиснених водах. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2024. Т. 2, № 49. С. 178–185. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321392>
3. Фуклєв О., Євтушенко М. Моделі розходження суден у стиснених водах. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2024. № 3 (41). С. 159–166. Doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.18 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/381/337>
4. Фуклєв О., Маслов І. Дослідження моделі та методи розрахунку гідродинаміки судна на хвилюванні. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2022. № 2(36). С. 150–165. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.12 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/238>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. Фуклєв О.І, Нікітін П.В., Шапіро Г.В. Дослідження особливості маломірного судна та системи управління його рухом// Дніпровські читання-2022: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 8 грудня 2022 р., м. Київ, 2022. С. 66-71.
6. Фуклєв О.І., Гороховська О.К. Знання-орієнтовані моделі та методи систем підтримки прийняття рішення судноводіння// Дніпровські читання-2024: зб. тез II міжн. наук. - практ. конф. 5 грудня 2024 р., м. Київ, 2024. С. 58-61.

ДОДАТОК В



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
(ДУТТ)

Вул. Кирілівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26
 E-mail: duitt@duitt.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«OK» 01 2025 № 04/01-11

УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи

 Оріон ДУДНИК



ЗАТВЕРДЖУЮ

Олена Тимошук, ректор

 Олександр ГРИЦУК

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
 ФУКЛСВА Олега Івановича тему «Знання-орієнтовані методи підтримки
 маневрування судна у стиснених водах»

Цей акт складено про те, що результати наукового дослідження за темою дисертаційної роботи ФУКЛСВА Олега Івановича «Знання-орієнтовані методи підтримки маневрування судна у стиснених водах», а саме удосконалена модель маневрування судна на мілководді та у стиснених водах використовуються в навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Забезпечення навігаційної безпеки плавання» та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

В.о. директора Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, доктор технічних наук, професор

 Олена ТИМОШУК

Декан факультету судноводіння, кандидат юридичних наук, доцент

 Олександр ЄЛСАЗАРОВ

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«НАВЧАЛЬНО-ТРЕНАЖЕРНИЙ
ЦЕНТР «ФЛАГМАН»»

адрес: Україна, м. Одеса
вул. Азовська, буд. 18
код: 47700000
web: www.Flagman-education
e-mail: info@flagman-education
+38 (0667) 083-43-43
+38 (0667) 083-43-43
+38 (0667) 083-43-43



UNITED LIABILITY
COMPANY
«EDUCATION AND TRAINING
CENTER «FLAGMAN»»

FLAGMAN, Ukraine, Odessa,
18 Azovskaya St.
code: 47700000
web: www.Flagman-education
e-mail: info@flagman-education
+38 (0667) 083-43-43
+38 (0667) 083-43-43
+38 (0667) 083-43-43

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи **ФУКЛЄВА Олега Івановича**
на тему «Знання-орієнтовані методи підтримки маневрування судна у стиснених
водах» на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності
271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Цей акт складено про те, що результати дослідження здобувача ступеня
доктора філософії Фуклєва Олега Івановича на тему «Знання-орієнтовані
методи підтримки маневрування судна у стиснених водах» мають практичне
значення та дійсно використовуються в діяльності ТОВ «Навчально-
тренажерний центр «ФЛАГМАН».

На підприємстві застосовується модель маневрування судна на мілководді та
у стиснених водах, яка враховує реологію мулу та генерацію внутрішніх хвиль в
розділі поверхні «вода-мул», що дозволяє підвищити описові можливості
маневрування судна для його застосування у методах розпізнавання на основі
штучних нейронних мереж системи підтримки прийняття рішення судноводіння.

Апробація результатів дисертаційної роботи Фуклєва О.І. підтверджує їх
практичну значущість та актуальність і визначає доцільність їх подальшого
впровадження у системі навчання, тренажерної підготовки та перепідготовки
офіцерів-судноводіїв.

Директор ТОВ НТЦ «ФЛАГМАН»



на КУПРАШВІЛІ

«19» *т. к. к. к.* 2024 р.