

ISSN 2313-4763

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

**НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1–2 (26–27)

Видається з 2009 року

Херсон
2023

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2023. № 1–2 (26–27). – 184 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії
(протокол № 5 від 23.11.2023 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Проценко В. О., д.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, головний редактор.

Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:

Зінченко С. М., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Riga Technical University, Латвія, членкиня редколегії;

Наговський Д. А., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Поливода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, членкиня редколегії;

Сіманенков А. Л., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Степенко С. А., к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, член редколегії;

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

Сапронов О. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Гусев В. М., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Dulebová Eudmila, Ph.D., Technical University of Kosice, Словаччина, членкиня редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, членкиня редколегії;

Сметанкін С. О., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аргун Щ. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, членкиня редколегії;

Гнатов А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Клевцов К. М., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Кулініч А. Г., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Носов П. С., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Patlins Antons, Dr. Sc. Ing., Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Шарко О. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Якущенко С. В., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73000, м. Херсон, просп. Незалежності, 20, тел.: (0552) 22-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова» міжнародною реферативною базою даних **Google Scholar**, міжнародною наукометричною базою **Researchbib**, представлений у Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського, міжнародній реферативній базі даних **Crossref**.

ISSN 2313-4763

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON STATE MARITIME ACADEMY**

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 1–2 (26–27)

Issued from 2009

Kherson
2023

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy : science journal. – Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2023. № 1–2 (26–27). – 184 p.

Founder and publisher – Kherson State Maritime Academy

*Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board
(minutes of the panel session № 5 from 23.11.2023)*

EDITORIAL STAFF:

Vladyslav Protsenko, Doctor of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, chief editor.

Thematic scope – Automation and computer integrated technologies:

Sergii Zinchenko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

Anastasia Zhiravetska, Doctor of Engineering Science, Professor, Riga Technical University, Latvia, member of editorial board;

Dmytro Nahovskyi, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Oksana Polivoda, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, member of editorial board;

Andrii Simanenkov, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Serhii Stepenko, Candidate of Engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of editorial board;

Mikola Khlopenko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board.

Thematic scope – Materials science and engineering:

Oleksandr Sapronov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

Oleksandr Akimov, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Viktor Husev, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Ludmila Dulebová, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Slovakia, member of editorial board;

Olha Syzonenko, Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;

Serhii Smetankin, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Petro Stukhlyak, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

Ihor Fesenko, Doctor of Engineering Science, V. Bakul Institute for Superhard Materials, Ukraine, member of editorial board.

Thematic scope – Transport technologies:

Andrii Buketov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

Sch. Arhun, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;

Andrii Hnatov, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;

Kostiantyn Klevtsov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Andrii Kulinich, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Oleh Lyashuk, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

Pavlo Nosov, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Latvia, member of editorial board;

Oleksandr Sharko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Serhii Yakyschenko, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board.

Address of the editorial board: 73000, Nezalezhnosti avenue, 20, Kherson city, Phone (0552) 22-35-69

Certificate of registration of the published media outlet by Resolution KB № 18987-7776ПІП from 11.05.2012

The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category “B” (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 from 02.07.2020).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

ISSN 2313-4763

© Scientific bulletin Kherson State
Maritime Academy, 2023

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

SEA AND RIVER TRANSPORT

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ПЛАНІВ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ

Бень А. П., к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

Соколов А. В., аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: arthursokolov7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3115-3854.

У статті досліджуються питання оптимізації вантажних планів контейнеровозів в умовах здійснення мультипортових контейнерних перевезень. Проведено порівняльний аналіз існуючих методів формування та оптимізації вантажних планів контейнеровозів та визначено переваги та недоліки практичного застосування кожного методу. Підкреслено потенційні проблеми, які виникають під час практичного застосування розглянутих аналітичних та евристичних методів. Визначено низку обов'язкових умов, які повинні бути виконані при складанні вантажного плану контейнеровозів та шляхи їх застосування в якості обмежень при вирішенні багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Проаналізовано особливості процесу побудови вантажних планів контейнеровозів при здійсненні мультипортових контейнерних перевезень та обґрунтовано вибір кращого методу розв'язання задачі оптимізації структури вантажного плану судна в зазначених умовах. Показано перспективність застосування багатоетапних адаптивних методів оптимізації вантажних планів контейнеровозів. Розроблено адаптивний багатоетапний метод формування оптимального вантажного плану судна та визначено функції системи підтримки прийняття рішень судноводія для його практичної реалізації. Запропоновано критерії оцінки якості оптимізації вантажного плану судна. Розглянуто перспективні шляхи подальшого розвитку та вдосконалення методів формування планів контейнеровозів у сучасних умовах.

***Ключові слова:** вантажний план контейнеровозу; методи багатокритеріальної оптимізації; мультипортові перевезення; системи підтримки прийняття рішень; управління судном; безпека судноплавства.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.006–016

Вступ. Зростання обсягів світових морських контейнерних перевезень та розмірів сучасних контейнеровозів обумовлює постійне підвищення вимог до їх безпечності та економічної ефективності. Найважливішою компонентою ефективних та безпечних контейнерних перевезень є складання раціонального вантажного плану контейнеровозу, який повинен одночасно відповідати багатьом, іноді взаємно суперечливим вимогам: забезпеченню максимально можливої контейнероємності судна, мультипортовості перевезень, скорочення часу виконання вантажних операцій в портах, дотримання вимог до сегрегації та розміщення небезпечних вантажів та вантажів з особливими умовами перевезення, збереження остійності судна тощо. Окремим питанням формування вантажного плану є також необхідність врахування мультипортовості контейнерних перевезень, оскільки наявність проміжних портів істотно впливає як на структуру вантажного плану судна, так і на вибір кращих методів розв'язання поставленої задачі.

Постановка проблеми. Вантажний план контейнеровозу визначає порядок розташування окремих контейнерів на судні у відповідності з технологічними вимогами до розміщення контейнерів та правилами перевезення вантажів. Слід зазначити, що нераціональне розміщення контейнерів призводить до необхідності здійснення зайвих вантажних операцій у порту – тимчасового переміщення одних контейнерів з метою вивільнення інших. Вказане явище має назву «шифтінг» і призводить до зниження економічної ефективності рейсу, оскільки потребує збільшення кількості вантажних операцій і тривалості перебування судна в порту, що обумовлює появу додаткових витрат (вартість переміщення одного невірної розташованого контейнера може сягати від кількох десятків до кількох сотень доларів). Окрім економічної ефективності виконання рейсу, шифтінг також має істотний вплив на його безпекову складову, оскільки саме від шифтінгу

залежить кількість вантажних операцій з контейнерами. Тому зменшення кількості шифтінгу є вельми актуальною науково-практичною задачею.

Особливо гостро проблема шифтінгу постає у випадках, коли під час здійснення рейсу судно заходить до кількох портів, в яких здійснюються операції завантаження/вивантаження контейнерів, оскільки в такому разі необхідно створювати оптимальний або субоптимальний вантажний план судна, який буде коригуватися протягом рейсу. Побудова такого вантажного плану потребує розробки нових та вдосконалення існуючих методів розв'язання багатокритеріальних оптимізаційних задач, а також створення відповідних систем для їх практичної реалізації, що і є предметом даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Проблематиці складання оптимальних вантажних планів контейнеровозів присвячена значна кількість наукових публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів, зокрема [1–17]. Визначено, що формування такого плану являє собою складну багатокритеріальну NP-повну оптимізаційну задачу, яка повинна вирішуватися за наявності низки певних функціональних та часових обмежень. На поточний момент часу зазначена проблема вирішена лише частково і постійно знаходиться у фокусі уваги науковців з різних країн. Слід зазначити, що значна кількість взаємовиключних обмежень, яких необхідно дотримуватись при складанні вантажного плану, призводить до суттєвого ускладнення зазначеної оптимізаційної задачі і вимушує дослідників створювати принципово різні методи її розв'язання, кожен з яких має як свої переваги, так і недоліки. Так, авторами в роботах [1, 3, 9, 10] запропоновано застосування точних методів оптимізації (лінійне або динамічне програмування, метод меж і гілок, пошук із заборонами, розташування за логічними тощо), у роботах [2, 4, 5, 7, 8] пропонується застосування евристичних, або ймовірнісних методів (імітація відпалу, жадібні, генетичні, мурашині або ройові алгоритми, метод променевого пошуку), а в роботах [6, 13, 16] розглянуто комбіноване застосування методів з двох вищевказаних груп. У свою чергу, слід зазначити, що оптимізація вантажного плану контейнеровозу у випадку здійснення мультипортових перевезень має ряд специфічних рис, які потребують розробки нових та вдосконалення наявних методів оптимізації вантажного плану судна.

Вирішенню цього питання та визначенню пріоритетних шляхів розвитку математичних моделей, методів та програмних засобів керування вантажними операціями контейнеровозів в умовах здійснення мультипортових рейсів і присвячена стаття.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу існуючих методів формування вантажних планів контейнеровозів та визначення шляхів їх подальшого вдосконалення для випадку застосування в задачах оптимізації вантажних операцій мультипортових контейнерних перевезень.

Виклад основного матеріалу. З математичної точки зору задача формування оптимального вантажного плану контейнеровозу являє собою багатокритеріальну оптимізаційну задачу тривимірного пакування з обмеженнями. Як зазначено в роботах [1, 2], за обчислювальною складністю ця задача є NP-повною, тому її розв'язання методом повного перебору всіх можливих варіантів розташувань контейнерів неможливе і потрібне застосування складних імітаційних або евристичних методів розв'язку. Слід зазначити, що застосування конкретного методу формування вантажного плану контейнеровозу суттєво залежить від специфіки класу задач, що вирішуються (технічні характеристики судна, кількість і тип контейнерів, що розміщуються, вид вантажів, кількість портів під час виконання рейсу, вантажне устаткування на судні та в портах, час розв'язання задачі, тощо).

Визначено, що при складанні вантажного плану контейнеровозу необхідно враховувати низку обов'язкових та додаткових обмежень, які можна структурувати наступним чином.

1. Дотримання вимог збереження міцності корпусу судна та врахування його конструктивних особливостей (поздовжня міцність корпусу, вигинаючі моменти, міцність палуби, розташування кришок люків та місць кріплення контейнерів тощо).

2. Дотримання вимог до збереження остійності судна (контроль припустимих меж для метацентричної висоти, осадки, крену та диференту).

3. Врахування послідовності завантаження-вивантаження контейнерів у відповідності з портами під час виконання рейсу (мінімізація «шифтіngu»).

4. Дотримання технологічних вимог до взаємного розташування і кріплення 20-ти та 40-ка футових контейнерів, а також контейнерів збільшеної висоти та довжини.

5. Врахування вимог, пов'язаних з сегрегацією вантажів та розміщенням небезпечних вантажів на судні.

6. Розміщення рефрижераторних та спеціалізованих контейнерів у заздалегідь призначених для них місцях.

Додатково при формуванні вантажного плану судна бажано враховувати характеристики вантажного обладнання та порядок здійснення вантажних робіт у портах призначення.

Розв'язання проблеми формування оптимального вантажного плану контейнеровозу досліджувалось багатьма вітчизняними і зарубіжними вченими. Існує значна кількість теоретичних і практичних розробок, присвячених розв'язанню і розвитку шляхів вирішення зазначеної проблеми.

Так, у роботі [1] визначено, що проблема планування завантаження контейнеровоза може бути зведена до лінійної двійкової моделі, а оптимальне рішення можна знайти виходячи із заздалегідь відомої кількості контейнерів, що завантажуються/вивантажуються в кожному з портів призначення. Зазначений підхід є суттєво спрощеним, оскільки виходить з припущення, що всі контейнери мають однаковий розмір та вагу, крім того, він має певні обмеження щодо кількості контейнерів, які підлягають розміщенню. Таким чином, його вивчення має переважно теоретичне значення, а реальне практичне застосування є вкрай обмеженим.

Авторами роботи [2] для вирішення задачі оптимального завантаження судна запропоновано застосування генетичного алгоритму, при цьому в якості функції відбору кращих рішень застосовуються обмеження стосовно дотримання умов збереження остійності судна. Запропонований підхід було застосовано для випадку контейнеровозу в 1000 TEU і кількох портів завантаження-вивантаження. Практичне застосування запропонованого підходу доцільне

У роботі [3] авторами застосовується двох етапний метод формування вантажного плану. На першому етапі застосовується метод гілок та меж для розміщення контейнерів по вантажним відсікам. На другому етапі за допомогою методу пошуку із заборонами відбувається розміщення контейнерів по комірках. Метод придатний для застосування на контейнеровозах невеликої контейнеромісткості, що перевозять переважно контейнери одного типу. Розміщення рефрижераторних, спеціалізованих контейнерів та контейнерів нестандартного розміру потребує внесення суттєвих модифікацій у запропоновані математичні моделі оптимізації.

Автори роботи [4] застосували для формування оптимального вантажного плану контейнеровозу алгоритм мурашиної колонії. Основними обмеженнями виступають вимоги до збереження остійності і міцності корпусу судна. В якості основних недоліків запропонованого підходу слід зазначити тривалий час розв'язання задачі, а також потенційну можливість втрати частки рішень, включаючи оптимальне.

У роботі [5] розглянуто використання методів імітації відпалу та генетичних алгоритмів. Зазначається, що вказані методи можуть бути застосовані для побудови вантажного плану судна у випадках виконання рейсу між кількома портами. Разом з тим, запропонована в роботі модель формування вантажного плану вельми ідеалізована і обмежена, оскільки базується на припущеннях, що всі контейнери мають однаковий тип і розмір (40 TEU), вага контейнерів також не враховується. Вказані обставини не дозволяють застосовувати її у явному вигляді для вирішення реальних практичних задач, хоча вона і

придатна для проведення порівняльного аналізу обох методів.

Автори роботи [6] пропонують використовувати для розв'язання задачі жадібні оптимізаційні алгоритми у поєднанні з логічними правилами. Зазначається, що істотним недоліком жадібного алгоритму є його чутливість до структури вантажного плану судна. Його застосування малоефективне для вантажних планів, що передбачають потенційну наявність значної кількості шифтінгу контейнерів, тобто, для мультипортових перевезень.

Застосування для формування вантажного плану контейнеровозу ройового евристичного алгоритму розглянуто у статті [7]. Сутність алгоритму полягає в пошуку оптимальних рішень шляхом імітаційного моделювання їх розташування за правилами ройового алгоритму з урахуванням п'яти основних характеристик для кожного контейнера: розмір, тип, вага, центр тяжіння та позиція розташування контейнеру. Недоліками пропонованого підходу є його схильність до знаходження локальних оптимумів, і, таким чином, втрати частки рішень, а також складність застосування для випадку мультипортових перевезень.

Одним з можливих шляхів оптимізації вантажного плану є застосування алгоритму променевого пошуку, як це запропоновано авторами в роботі [8]. Перевагою зазначеного методу є порівняно низька обчислювальна складність і відповідно, висока, у порівнянні з іншими методами, швидкість отримання рішень. Втім, він має істотні недоліки, головними з яких є обмежена область пошуку і висока ресурсомісткість. Застосування методу не гарантує знаходження оптимального рішення, також існує велика ймовірність втрати частки рішень. З огляду на вищезазначене, практичне застосування алгоритму променевого пошуку можливе лише у поєднанні з іншими методами оптимізації, тому авторами статті додатково було застосовано метод пошуку із заборонами.

Авторами роботи [9] проаналізовано особливості складання вантажного плану судна при наявності небезпечних вантажів, з урахуванням вимог IMDG Code (International maritime dangerous goods code, Міжнародний кодекс морського перевезення небезпечних вантажів). Пропонується застосування адитивного алгоритму розміщення, що базується на принципах цілочисельного лінійного програмування. Місця розташування контейнерів з небезпечними вантажами. Проте, внаслідок високої обчислювальної складності, пропонований підхід може бути застосований лише для вантажних планів невеликої розмірності.

Грунтовний аналіз особливостей застосування класичних методів цілочисельного лінійного програмування для розв'язання задачі оптимізації вантажного плану контейнеровозу наведено у роботі [10], автори якої зазначають, що їх практичне застосування доцільно здійснювати у комбінації з евристичними методами пошуку рішень.

Питання дотримання вимог остійності та міцності корпусу судна при складанні вантажного плану контейнеровозу докладно розглянуті в роботах [11, 12]. Зазначається, що незалежно від обраного методу оптимізації, вищезазначені вимоги виступають в якості обмежень області пошуку рішень, що дозволяє істотно зменшити кількість варіантів розташувань контейнерів, що аналізуються, та скоротити час, потрібний на знаходження розв'язку задачі.

Додатковими обмеженнями, що доцільно застосовувати при формуванні вантажного плану є особливості портової інфраструктури. Так, авторами роботи [13], зокрема вказано, що з метою скорочення витрат часу на проведення вантажних операцій у портах при складанні вантажного плану судна необхідно додатково враховувати технічні можливості вантажного обладнання порту (кількість та розташування вантажних кранів) і порядок здійснення вантажних операцій у ньому.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз робіт зарубіжних та вітчизняних авторів дозволив визначити переваги та недоліки кожного із вищезазначених методів, а також обмеження, що до умов їх практичного застосування, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики існуючих методів формування вантажних планів контейнеровозів

№	Метод формування вантажного плану/математичні моделі, що застосовуються	Спосіб пошуку рішення	Обчислювальна складність/час пошуку рішення	Тип рішення, що буде отримано	Обмеження/особливості застосування
1	2	3	4	5	6
1	Повного перебору	Аналітичний, розрахунковий	Дуже висока/ Дуже довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	З огляду на вкрай високу обчислювальну складність, на практиці не застосовується. В окремих випадках може бути застосований для перевірки рішень, отриманих іншими методами.
2	Лінійне програмування	Аналітичний, розрахунковий	Висока/ Довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	Має високу обчислювальну складність. Може бути застосований для розв'язання задач малої розмірності. Практичне застосування для формування вантажного плану можливе у комбінації з евристичними методами
3	Розташування за правилами	Аналітичний, формально-логічний	Висока/ Довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	Має високу обчислювальну складність. Практичне застосування потребує введення низки додаткових обмежень або комбінації з евристичними методами.
4	Імітація відпалу	Ймовірнісний, імітаційне моделювання	Висока/ Довгий	Множина субоптимальних рішень	Має високу обчислювальну складність. Необхідно враховувати схильність методу до знаходження множини локальних оптимумів. Потребує додаткового аналізу/перегляду отриманих рішень.
5	Генетичні алгоритми	Ймовірнісний, імітаційне моделювання	Середня/ Середній	Множина субоптимальних рішень (можливе знаходження оптимального)	Потребує застосування складних обчислювальних процедур імітаційного моделювання. Бажано проведення додаткового порівняння отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращого.
6	Метод меж і гілок	Аналітичний, динамічне програмування	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Можлива втрата частки рішень.
7	Пошук із заборонами (табу пошук)	Аналітичний, динамічне програмування	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Можлива втрата частки рішень.

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
8	Метод мурашиної колонії	Евристично-ймовірнісний	Середня/ Середній	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Потребує застосування ітераційних обчислювальних процедур імітаційного моделювання. Необхідно проведення додаткового порівняння отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращого.
9	Жадібний алгоритм	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Малопридатний для вантажних планів із значною кількістю портів. Можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.
10	Ройовий алгоритм	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Малопридатний для вантажних планів із значною кількістю портів. Можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.
11	Метод променів	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Обмежена область пошуку рішень, висока ресурсомісткість, можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.

Виходячи з інформації, що наведена у таблиці, можна зробити висновок, що методи, які застосовуються для вирішення поставленої задачі, можуть бути розділені на дві великі групи – точні (аналітичні) та евристичні (ймовірнісні). Перевагою точних методів (лінійне або динамічне програмування, повний перебір, тощо) є повна детермінованість і можливість гарантованого знаходження найбільш оптимального рішення. Проте, їх головним недоліком є висока обчислювальна складність, що унеможливорює застосування таких методів без певних обмежень для знаходження рішення в потрібний проміжок часу. Евристичні методи (генетичні алгоритми, імітація відпалу, метод мурашиної колонії, пошук із заборонами, ройовий алгоритм, жадібний алгоритм, променевий алгоритм) навпаки, дозволяють знаходити необхідне рішення відносно швидко, але воно буде лише субоптимальним (проте прийнятним з практичної точки зору для вирішення поставленої задачі). Недоліком евристичних методів також є більш трудомістка, у порівнянні з класичними оптимізаційними процедурами, програмна реалізація та необхідність додаткової перевірки отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращих.

Приймаючи до уваги обчислювальну складність формування вантажного плану, можна зробити висновок, що на початковому етапі (побудова основи, або так званого «каркасу» вантажного плану) перевагу слід надати точним та детермінованим методам пошуку рішень, а на завершальному, при остаточному визначенні позиції кожного контейнера на судні, краще застосовувати евристичні. Таким чином, вантажний план судна формуватиметься шляхом комбінованого застосування аналітичних та евристичних методів. У такому випадку початкова схема розміщення контейнерів на судні, тобто планування розміщення контейнерів на судні по беям з урахуванням конструкційних характеристик судна та технологічних умов виконання рейсу, або задача, більш відома як Master Bay

Planning Problem (MBVP) [2], буде вирішуватися за допомогою аналітичних оптимізаційних методів, оскільки її обчислювальна складність порівняно невисока. Задача остаточного розміщення контейнерів по комірках, відома як Slot Planning Problem (SPP) буде вирішуватися шляхом застосування евристичних методів.

У роботах [14–17] розглянуті питання оптимізації вантажних планів контейнеровозів для випадків мультипортових перевезень. Зокрема визначено, що такі перевезення потребують застосування більш складних оптимізаційних процедур формування вантажного плану судна, оскільки додатково виникає потреба в його послідовному коригуванні у відповідності з портами слідування судна.

Таким чином, складність побудови вантажного плану контейнеровозу у випадку здійснення мультипортових перевезень полягає в додатковій необхідності здійснення послідовних ітераційних процедур перегляду і оптимізації вантажного плану судна в процесі виконання всього рейсу.

Виходячи з вищенаведеного, пропонується застосування адаптивного багатоетапного методу формування вантажного плану, застосування якого у такому випадку найбільш доцільне. Сутність розробленого методу полягає у послідовному виконанні наступних етапів.

1. Визначення початкової інформації стосовно технічних характеристик судна, умов виконання рейсу, послідовності портів призначення, кількості, ваги, та типу вантажів, що перевозяться.

2. Розрахунок на основі отриманої інформації множини обов'язкових обмежень вантажного плану (дотримання вимог до збереження міцності корпусу, остійності, диференту і крену судна, розміщення рефрижераторів, контейнерів нестандартних розмірів та контейнерів з небезпечними вантажами, розміщення контейнерів по беям у відповідності до послідовності портів призначення, не перекриття кришок люків, вимог граничних навантажень на палубу судна).

3. Формування каркасу вантажного плану із застосуванням логічних правил розміщення контейнерів, що забезпечують дотримання всіх обмежень, визначених на попередньому кроці.

4. Оптимізація каркасу вантажного плану із застосуванням методів лінійного програмування, визначення масивів контейнерів, які можуть бути перегруповані.

5. Заповнення каркасу із застосуванням евристичних методів: розміщення окремих контейнерів за комірками відповідно до умов взаємного розташування 20-ти та 40-ка футових контейнерів, рефрижераторів, контейнерів нестандартних розмірів та контейнерів з небезпечними вантажами, розташування однотипних контейнерів за вагою відповідно до дотримання вимог остійності.

6. Уточнення заповненого каркасу із застосуванням евристичних методів відповідно із порядком здійснення запланованих вантажних операцій у наступних портах виконання рейсу.

7. Ітеративний адаптивний перегляд та внесення змін до вантажного плану в кожному наступному порту призначення – виконання кроків 3, 4, 5, 6 або лише 5, 6 у залежності від кількості та типу контейнерів, що підлягають завантаженню/розвантаженню в поточному порту.

Особливостями запропонованого методу вирішення поставленої задачі у порівнянні з вже існуючими є врахування потреб мультипортових контейнерних перевезень до адаптивного перегляду вантажного плану в проміжних портах рейсу відповідно до вантажних операцій, які будуть в них виконуватись.

Практичне застосування наведеного методу оптимізації буде здійснено в межах запровадження спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) керування процесом створення вантажного плану контейнеровозу. Функціонально СППР забезпечує виконання наступних задач:

- формування та графічна візуалізація каркасу вантажного плану судна з урахуванням конструктивних особливостей та конфігурації його вантажних приміщень;
- заповнення каркасу вантажного плану контейнерами, що перевозяться із застосуванням евристичних методів та надання кількох можливих варіантів розміщень судноводію з метою вибору ним найкращого;
- адаптивний перегляд обраного варіанту вантажного плану в кожному порту призначення при внесенні необхідних коригувань.
- розрахунок параметрів остійності та дотримання вимог збереження міцності корпусу судна для заданого вантажного плану.

Якість вантажного плану, що сформований, оцінюється за критеріями мінімізації часу виконання вантажних операцій, зменшення кількості шифтінгу контейнерів, забезпечення технологічності та дотримання вимог безпеки виконання вантажних робіт, дотримання регламентованих умов розміщення та перевезення вантажів.

Висновки. На поточний момент часу стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє ускладненню логістичних ланцюжків поставок товарів, що сприяє збільшенню частки мультипортових перевезень контейнерів у сучасному судноплаванні. Мультипортові перевезення, у свою чергу, обумовлюють ряд додаткових специфічних вимог до складання вантажного плану судна, які обов'язково необхідно враховувати для забезпечення безпеки виконання рейсу та підвищення його економічної ефективності. Підвищення економічної ефективності виконання рейсу може бути досягнуто, перш за все, за рахунок скорочення витрат, пов'язаних із знаходженням судна в портах, зменшенням часу виконання та вартістю вантажних операцій, тощо. У випадку контейнерних перевезень це може бути здійснено шляхом зменшення кількості шифтінгу контейнерів на судні під час виконання вантажних операцій. Зменшення операцій шифтінгу контейнерів у портах потребує створення нових та вдосконалення існуючих методів розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі складання раціонального вантажного плану судна.

Приймаючи до уваги результати проведеного порівняльного аналізу існуючих підходів і методів її вирішення, можна зробити висновок, що у випадку мультипортових перевезень доцільно здійснювати формування вантажного плану в кілька етапів. Під час виконання початкового етапу формується узагальнений («огрублений») вантажний план, який враховує всі початкові і найважливіші обмеження по розміщенню контейнерів на судні. Таким чином формується так званий головний «каркас» вантажного плану судна. На наступному етапі здійснюється заповнення створеного «каркасу» контейнерами і його уточнення до конкретної позиції кожного окремого контейнера. У разі здійснення мультипортових контейнерних перевезень останній етап ітеративно повторюється в кожному з портів заходу судна з метою внесення додаткових змін до вантажного плану, які можуть виникнути під час виконання рейсу. В окремих випадках зміни можуть бути також внесені в каркас вантажного плану.

Практична реалізація запропонованого підходу до формування вантажного плану контейнеровозу можлива шляхом створення СППР судноводія. Застосування такої системи не потребуватиме її глибокої інтеграції з загальносудовими системами (необхідне лише початкове завдання технічних характеристик судна та конструктивних особливостей розміщення вантажу), оскільки вона виконуватиме лише інформаційно-дорадчі функції, а остаточне рішення з визначення кінцевого варіанту вантажного плану залишатиметься за судноводієм.

Слід зауважити, що при розробці математичних моделей і методів, які використовуються для формування вантажного плану, також необхідно обов'язково враховувати їх обчислювальну складність, оскільки вона суттєво впливає на придатність з точки зору практичної реалізації та розробку відповідних програмних засобів.

Перспективи подальших досліджень.

Проведені дослідження показали необхідність удосконалення і подальшого розвитку моделей і методів керування процесами завантаження контейнеровозів у зв'язку із збільшенням обсягів світових контейнерних перевезень та ускладненням логістичних ланцюжків транспортування товарів. Приймаючи до уваги наявні обчислювальні можливості сучасних персональних комп'ютерів, пріоритетним напрямом досліджень постає розвиток евристичних та імітаційних методів оптимізації. Також у зв'язку із наявною тенденцією до зростання розмірів і контейнеромісткості суден, посиленням вимог до формування їх вантажних планів, а також керування вантажними операціями в цілому, перспективним є створення спеціалізованих автоматизованих систем керування вантажними операціями з елементами СППР, що дозволить підвищити безпеку виконання вантажних операцій та економічну ефективність виконання рейсів суднами-контейнеровозами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. № 38.2. P. 81–99.
2. Dubrovsky O., Levitin G., Penn, M. A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*. 2002. Vol. 8. No. 6. P. 585–599.
3. Fan L., Low M. Y. H., Hsu W. J., Huang Sh. Y., Zeng M., Win Ch. A. Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans. *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. P. 256–272.
4. Hernández Hernández P., Cruz-Reyes L., Melin P., Mar-Ortiz J., Joaquín Fraire Huacuja H., José Puga Soberanes H, Javier González Barbosa J. An Ant Colony Algorithm for Improving Ship Stability in the Containership Stowage Problem. *MICAI 2013: Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 2013. P. 93–104.
5. Yurtseven M. A., Boulougouris E., Turan O. Container ship stowage plan using steepest ascent hill climbing, genetic, and simulated annealing algorithms. *Marine Design XIII*. 2018. vol. 1. P. 617–623.
6. Rahsed D. M., Gheith M. S., Eltawil A. B. A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December 2018. P. 437–441.
7. Matsaini, Santosa B. Solving the container stowage problem (CSP) using particle swarm optimization (PSO). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. vol. 337, article no. 012002.
8. Kim K. H., Kang J. S., Ryu K. R. A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals[J]. *OR Spectrum*. 2004. vol. 26. no. 1. P. 93–116.
9. Камєнєв К. І., Камєнєва А. В. Використання адитивного алгоритму для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні. *Судовождение*. 2018. № 28. С. 70–77.
10. Li F., Tian C., Cao R., Ding W. An Integer Linear Programming for Container Stowage Problem. In: Bubak M., van Albada G.D., Dongarra J., Sloot P.M.A. (eds) *Computational Science – ICCS 2008*. ICCS 2008. *Lecture Notes in Computer Science*. vol. 5101. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 853–862.
11. Накул Ю. О., Математична модель остійності судна при розподілі ваги контейнерів. *Наукові праці ЧНУ ім. Петра Могили. Серія: “Комп'ютерні технології”*. 2018. Вип. 305. Т. 317. С. 18–22.
12. Yaagoubi A. E., Alaoui E. H., Boukachour J. Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL 2018 : The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le

Havre, France. IEEE : 2018. P. 214–230.

13. Azevedo A. T., Neto L. L. S., Chaves A. A., Moretti A. C. Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. 2018. vol. 65. P. 495–516.

14. Цимбал М. М. Формування плану завантаження контейнеровозу. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. №1(22). С. 64–73.

15. Бень А. П., Федоров А. І. Формування вантажного плану контейнеровозу при здійсненні мультипортових перевезень. *Судноводіння*. 2019. №29. С. 10–19.

16. Федоров А. І. Метод формування субоптимального вантажного плану контейнеровозу. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. №25. С. 96–100.

17. Цымбал М. Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. *Судноводіння*. 2019. Вип. 29. С. 35–41.

REFERENCES

1. Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E. (2004). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. № 38.2. P. 81–99.

2. Dubrovsky, O., Levitin, G., Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*. Vol. 8. No. 6. P. 585–599.

3. Fan, L., Low, M. Y. H., Hsu, W. J., Huang, Sh. Y., Zeng, M., Win, Ch. A. (2011). Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans. *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 256–272.

4. Hernández Hernández, P., Cruz-Reyes, L., Melin, P., Mar-Ortiz, J., Joaquín Fraire Huacuja, H., José Puga Soberanes, H, Javier González Barbosa, J. (2013). An Ant Colony Algorithm for Improving Ship Stability in the Containership Stowage Problem. *MICAI 2013: Mexican International Conference on Artificial Intelligence*. P. 93–104.

5. Yurtseven, M. A., Boulougouris, E., Turan, O. (2018). Container ship stowage plan using steepest ascent hill climbing, genetic, and simulated annealing algorithms. *Marine Design XIII*. vol. 1. P. 617–623.

6. Rahsed, D. M., Gheith, M. S., Eltawil, A. B. (2018). A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December. P. 437–441.

7. Matsaini, Santosa B. (2018). Solving the container stowage problem (CSP) using particle swarm optimization (PSO). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. vol. 337, article no. 012002.

8. Kim, K. H., Kang, J. S., Ryu, K. R. (2004). A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals[J]. *OR Spectrum*. vol. 26. no. 1. P. 93–116.

9. Kamieniev, K. I., Kamienieva, A. V. (2018). Vykopyctannia adytyvnoho alhopytmu dlia pozmyshchennia nebezpechnykh vantazhiv na konteinerному судні. *Cudovozhdenye*. № 28. S. 70–77.

10. Li, F., Tian, C., Cao, R., Ding, W. (2008). An Integer Linear Programming for Container Stowage Problem. In: Bubak M., van Albada G. D., Dongarra J., Sloot P. M. A. (eds) *Computational Science – ICCS 2008*. ICCS 2008. *Lecture Notes in Computer Science*. vol. 5101. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 853–862.

11. Nakul, Yu. O. (2018). Matematychna model ostiinosti sudna pry rozpodili vahy konteineriv. *Naukovi pratsi ChNU im. Petra Mohyly*. Seria: “Kompiuterni tekhnolohii”. Vyp. 305. T. 317. S. 18–22.

12. Yaagoubi, A. E., Alaoui, E. H., Boukachour, J. (2018). Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL*

2018 : *The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le Havre, France. IEEE : P. 214–230.

13. Azevedo, A. T., Neto, L. L. S., Chaves, A. A., Moretti, A. C. (2018). Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. vol. 65. P. 495–516.

14. Tsymbal, M. M. (2020). Formuvannia planu zavantazhennia konteinerovoza. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. №1(22). S. 64–73.

15. Ben, A. P., Fedorov, A. I. (2019). Formuvannia vantazhnoho planu konteinerovoza pry zdiisneni multyportovykh perevezen. *Sudnovodinnia*. №29. S. 10–19.

16. Fedorov, A. I. (2019). Metod formuvannia suboptimalnoho vantazhnoho planu konteinerovoza. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*. №25. S. 96–100.

17. Tsymbal, M. N. (2019). Formirovaniye tenzora zagruzki konteynerovoza v sluchaye provedeniya gruzovykh operatsiy v neskol'kikh portakh. *Sudnovodinnia*. Vip. 29. S. 35–41.

Ben A. P., Sokolov A. V. ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF THE METHODS OF CONTAINER CARGO PLANS FORMATION AND WAYS OF THEIR FURTHER IMPROVEMENT

The article is devoted to optimization of container carriers' cargo plans in the conditions of multiport container transportation. A comparative analysis of the existing methods of formation and optimization of container carriers' cargo plans was carried out, and the advantages and disadvantages of the practical application of each method were determined. The potential problems that arise during the practical application of the considered analytical and heuristic methods are emphasized. A number of mandatory conditions that must be met when drawing up the cargo plan of container carriers and the ways of their application as restrictions when solving a multi-criteria optimization problem are defined. The peculiarities of the process of building container carriers' cargo plans during multiport container transportation are analyzed and the choice of the best method for solving the task of optimizing the structure of the ship's cargo plan under the specified conditions is substantiated. The perspective of using multi-stage adaptive methods for optimizing cargo plans of container carriers is shown.

An adaptive multi-stage method of forming the optimal cargo plan of the vessel has been developed and the functions of the decision-making support system of the shipmaster for its practical implementation have been determined. The criteria for evaluating the quality of optimization of the ship's cargo plan are proposed. Prospective ways of further development and improvement of methods of forming plans of container carriers in modern conditions are considered.

Key words: container ship cargo plan; multi-criteria optimization methods; multi-port transportation; decision support systems; ship control; safety navigation.

© Бень А. П., Соколов А. В.

Статтю прийнято
до редакції 12.11.2023

УДК 681.5.04

ПЕРСПЕКТИВНА СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ МОРСЬКИХ ГЛИБИН

Калініченко Є. В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри «Навігації і керування судном», Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2898-7313;

Заєць А. Ю., к.т.н., доцент кафедри «Суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю. Л. Воробйова», Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: au.lopatnyova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5803-9069.

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконання різних підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів. У статті розглянуті проблеми розробки системи управління для автономних підводних апаратів. Вказано, що існуючі системи управління призначені переважно для вирішення завдань пошукового класу, але автономні підводні апарати можуть використовуватися для виконання складніших завдань, таких як обстеження. Для успішного виконання таких завдань автономним підводним апаратам необхідна система управління, яка може гнучко реагувати на нові завдання та дані від бортових датчиків. У статті запропонована нова архітектура математичного забезпечення системи управління автономними підводними апаратами, яка використовує як ієрархічні, так і поведінкові управлінські структури. Це значно розширює можливості автономних підводних апаратів, дозволяючи йому вирішувати завдання різних класів в умовах обмежень обчислювальних ресурсів бортової обчислювальної мережі. У рамках запропонованої архітектури використовується поведінковий підхід на різних рівнях функціональної ієрархічної системи управління. При цьому управлінські структури виконавчого рівня мають постійний склад, а на тактичному рівні формуються змінні структури, які створюються на основі розробленої бібліотеки агентів. Це забезпечує легке нарощування функціональності по мірі появи нових завдань та апаратних засобів. Обґрунтовано підхід щодо побудови бібліотеки агентів тактичного рівня на основі функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Дії робота формуються в термінах агентів, що утворюють бібліотеку, яка забезпечує основу для створення декларативних місії. Розроблена та досліджена структура агента, яка містить локальну модель середовища, засоби планування дій на базі цієї моделі та аналізу використовуваної інформації для визначення працездатності агента. Відповідна система управління може бути запропонована в подальшому для випробування на автономних підводних апаратах.

Ключові слова: автономні підводні апарати; поведінкова архітектура; ієрархічна архітектура; гібридна архітектура; координація; конфлікти; надійність; агенти.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.017–028

Постановка проблеми. Автономні підводні апарати (АПА) – це безпечний та ефективний спосіб вивчення морських глибин та виконання різних підводних операцій. Вони широко використовуються по всьому світу для виконання пошукових завдань і завдань обстеження, таких як рятувальні операції, батиметричні вимірювання, моніторинг океанології та екології, а також протимінні заходи. АПА також можуть використовуватися для виконання складних пошуково-дослідницьких завдань, таких як автоматична інспекція підводних комунікацій, пошук джерел екологічного забруднення та виявлення аномалій [1]. Однак такі операції вимагають наявності розвиненої системи поведінки, яка може гнучко реагувати на нові завдання та дані від бортових датчиків.

Особливості роботи АПА, включаючи обмеженість акустичного зв'язку, обмежений вибір датчиків та обмежений доступ до навігаційної системи, вимагають спеціального підходу до управління. Проте широке практичне використання АПА в нових областях обмежене тим, що існуючі системи управління переважно призначені для вирішення завдань пошукового класу. У цьому контексті виникають труднощі у формулюванні завдань та забезпеченні постійного інформаційного зв'язку з оператором [2].

Ключова проблема полягає в недостатності існуючих методів опису завдань та архітектури систем управління загалом, а також їх програмного забезпечення, зокрема, для

завдань обстеження. Це призводить до складнощів у розробці підходів, необхідних для ефективного використання АПА. Крім того, базові аспекти координації кількох операцій під час обстеження потребують додаткової розробки. Важливість вирішення цих проблем та необхідність розробки математичного забезпечення системи управління для виконання операцій обстеження підтверджують актуальність цієї статті. Загалом існує необхідність у створенні підходу до формування поведінки АПА, яка дозволить успішно виконувати операції обстеження класу.

Нехай T представляє сукупність завдань обстеження морських глибин та підводних операцій. Таким чином, задача полягає у розкладанні сукупності завдань T на підзадачі T_i , де i належить до деякої індексної множини I , таким чином, щоб оптимізувати ефективність вирішення цих завдань. Нехай $F(T)$ представляє функцію, яка оцінює загальну складність вирішення сукупності завдань T . Метою є знайти оптимальний розклад $T = \bigcup_{i \in I} T_i$, який мінімізує функцію складності $F(T)$, враховуючи внутрішні зв'язки та оптимальну функціональну декомпозицію цільового класу завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності управління підводними роботами, наприклад, які визначені в роботах [3–9].

У науковому дослідженні [3] розглянуті і проаналізовані сучасні виклики, пов'язані з розвитком підводної робототехніки. Зокрема, дослідження охоплює широкий спектр аспектів, пов'язаних з цією галуззю: від проектування та оптимізації систем до проблем комунікації, використання машинного навчання, картографування, координації та адаптивного планування місій. Ця робота розкриває складність завдань, пов'язаних з підводною робототехнікою, а також намагається відповісти на питання, що стосуються майбутнього розвитку цієї сфери. Підводна робототехніка, як і будь-яка інша наука, постійно вдосконалюється, і дослідження розглядає потенціал наступного покоління підводних роботів. Це дослідження дає можливість зрозуміти, які виклики стоять перед дослідниками та інженерами у сфері підводної робототехніки і, які можливості відкриваються завдяки вдосконаленню технологій. Висвітлюються ключові аспекти, які вимагають уваги, і висувуються ідеї щодо подолання складних технічних викликів, що стоять на шляху до подальшого росту цієї динамічної галузі.

Наукова стаття [4] спрямована на дослідження та аналіз актуальних досягнень у сфері підводної робототехніки, зокрема у контексті застосування штучного інтелекту. Основною метою даного дослідження є здійснення комплексного огляду новітніх розробок, що стосуються використання інноваційних методів штучного інтелекту. Стаття фокусується на важливих аспектах взаємодії підводних роботів з оточуючим середовищем та здатності роботів до самостійної роботи в умовах підводного простору. Одним з ключових напрямів є навчання моделей штучного інтелекту, що дозволяє роботам вчитися на основі накопиченого досвіду та взаємодії з динамічно змінюваним середовищем.

У науковій статті [5] було створено математичну концепцію, яка описує гідродинамічну силу з урахуванням впливу стінки на точне управління і маневреність підводного робота складної геометрії. Автори представили вдосконалену гідродинамічну модель для робота, яка спеціально розроблена для ситуацій, коли взаємодія зі стінкою важлива, але раніше цей аспект часто упускали у розгляді роботів, які діють у водоймах. Спочатку, гідродинамічні коефіцієнти в цій моделі, включаючи в'язкий та інерційний коефіцієнти, були визначені через аналіз стаціонарного та нестаціонарного руху. Використовуючи методи обчислювальної гідродинаміки, була встановлена залежність гідродинамічної сили від відстані до стінки та швидкості руху робота. Також було визначено область впливу стінки на рух робота. Останнім етапом було експериментальне вимірювання гідродинамічних коефіцієнтів в умовах резервуара з циркулюючою водою, враховуючи вплив стінки на гідродинамічну силу. Отримані результати підтвердили точність математичної моделі та надійність використаних методів обчислювальної гідродинаміки. У підсумку, дана стаття розкриває новий підхід до моделювання гідродинамічних взаємодій, що враховують

вплив стінки на рух підводних роботів. Використання обчислювальної гідродинаміки у поєднанні з експериментами дозволило створити точну та надійну математичну модель для дослідження та покращення маневреності та управління цих роботів.

У роботі [6] аналізується амфібійний дослідницький робот сферичної форми, який володіє можливістю ефективного руху як у водному середовищі, так і на суходолі. Він вирізняється гнучкістю переміщення, витримкою від тиску води та можливістю виконувати обертальні рухи з нульовим радіусом повороту. Однак, на основі отриманих практичних результатів експерименту було виявлено, що однією з недоліків цього робота є обмежена максимальна швидкість здійснення стрибків напруги. Ця наукова стаття визначає головну мету – покращення показників максимальної швидкості здійснення стрибків напруги та зменшення небажаних коливань важкого маятника. Автори ставлять перед собою завдання удосконалити робота, щоб він міг досягати більш високих швидкостей під час здійснення руху, особливо у важких умовах напруженості. Це дослідження має значущість, оскільки вдосконалення максимальної швидкості руху та управління стрибками напруги може значно розширити можливості застосування цього амфібійного робота в різних ситуаціях, де швидкість та точність руху є ключовими факторами успішного виконання завдань.

У роботі [7] зроблено критичний огляд сучасних досягнень в автоматизованому плануванні для флоту АПА. Оскільки автоматизоване планування місій для флотів АПА може бути інструментом для зниження складності програмування завдань транспортних засобів та проведення оцінки правильності для цілей, визначених кінцевим користувачем, дозволяючи оператору зосередитися на оцінці ризику.

Роботи [8] та [9] узагальнюють різні стратегії планування шляху для АПА, включаючи метод моделювання, та алгоритм пошуку шляху на основі характеристик підводних середовищ як передбачуваних та непередбачуваних. Аналізуються переваги та недоліки різних методів моделювання та методи моделювання для різних середовищ таких як: методи на основі пошуку геометричної моделі, алгоритми на основі ймовірнісного вибірку, алгоритми на основі штучного потенційного поля та інтелектуальні алгоритми.

У даній статті [10] висвітлено дієву систему управління для автономних підводних роботів. У цьому підході використовується внутрішня оперативна пам'ять для забезпечення надійності замість використання зовнішньої системи управління. Для досягнення кращої стабілізації балансу під час руху робота вперед використовується нечіткий логічний контролер, побудований на основі мікроконтролера. Цей інноваційний підхід має у своєму складі не лише нечіткий пропорційно-інтегральний контролер як наглядча, але також використовується спільно з ним для забезпечення кращої динамічності та стійкості підводних роботів. Під час практичної реалізації були проведені експерименти, що підтверджують ефективність цього підходу. Такий підхід до управління підводними роботами відкриває нові можливості для покращення їхньої продуктивності та надійності. Використання вбудованої оперативної пам'яті та нечіткого логічного контролера є інноваційними кроками в розвитку систем автономного управління, які допомагають забезпечити ефективну та стійку роботу під водою.

У статті [11] було виголошено надійний метод для ефективного управління поведінкою підводного робота, який має п'ять ступенів свободи. Новий підхід включає розробку нового типу двигунів, що можуть обертатися на повний оборот, і використання масового перемикача. Ця комбінація дозволяє роботу змінювати свою глибину швидко і легко, зі зменшеними витратами енергії, зберігаючи при цьому стабільний баланс.

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконання різних підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів. Конкретизуючи цю мету, підводні операції можуть включати сканування дна, виявлення та дослідження об'єктів на дні моря, картографування та навігацію у складних умовах. Параметри ефективності, які можуть бути підвищені, включають точність та швидкість виконання завдань, зниження споживання

ресурсів (таких як час, енергія, обчислювальні потужності), збільшення глибини обстеження та здатність пристосовуватися до змінних умов довкілля під водою.

Викладення основного матеріалу дослідження. На сьогоднішній день для мобільних роботів використовуються ієрархічні, поведінкові та гібридні архітектури математичного забезпечення для систем управління. Для більш докладного аналізу цих архітектур висуваються певні вимоги до інформаційно-управлінських систем (ІУС) АПА: зменшення використання обчислювальних ресурсів, вирішення конфліктів між різними цілями, використання інформації з різних датчиків, надійність, можливість поетапного розширення функціональності, простота у використанні та широкий спектр реалізації [12].

Ієрархічна архітектура будується на основі знань і має у своєму складі точне представлення оточуючого середовища у символічній формі. Рішення приймаються на основі формальних міркувань, що є однією з переваг цієї архітектури. Однак вона спрямована на використання роботів у структурованих і спостережуваних середовищах. Її застосування в багатоцільових автономних наземних платформах ускладнюється через високі вимоги до обчислювальної потужності та обмежену гнучкість [13].

У поведінковій архітектурі процес управління розбивається на основі бажаних зовнішніх проявів дій робота. Поведінка робота формується з операцій, виконуваних незалежними елементами (поведінками або агентами). Кожна поведінка спрямована на досягнення конкретної цілі, а її реакція базується на поточних даних з датчиків. Вплив на виконавчі пристрої робота обмежується певною підмножиною. Переваги поведінкової архітектури складаються у простоті реалізації, гнучкості (можливість етапного розширення) та низьких вимогах до обчислювальних ресурсів, що є важливим для багатоцільових автономних наземних платформ. Однак недоліки мають значний вплив суб'єктивних факторів при розподілі пріоритетів, функцій та взаємодії між різними поведінками [2, 5].

Однією з головних складнощів у поведінковому підході є забезпечення співпраці між групою активних поведінок. Існує декілька методів координації, серед яких можна виділити абсорбцію, вибір дії на основі оцінки активності кожної з поведінок, голосування та сумування. Кожен з цих методів найбільше підходить для певного класу завдань, проте загалом конкурентні методи з абсорбцією забезпечують більшу стійкість.

Гібридні архітектури по-різному поєднують у собі характеристики вищезгаданих архітектур. Наприклад, архітектура цілеспрямованої поведінки не зосереджується на складі та взаємодії модулів, а розглядає три рівні ієрархії з фіксованим розподілом функцій між ними (стратегічний, тактичний та виконавчий).

При розробці архітектури для АПА повинні обов'язково враховуватися вимоги до мінімізації використання ресурсів, гнучкості та можливості послідовного розширення. Отже, базовою для розробки архітектури авторами була прийнята трьохрівнева модель з розподілом функцій, що характерна для архітектури цілеспрямованої поведінки. Однак варто відзначити, що використання поведінкових керуючих структур (багаторівневих структур з абсорбцією) на виконавчому та тактичному рівнях є ключовою особливістю запропонованої архітектури. Такий підхід дозволив авторам виокремити явні завдання для АПА на верхньому рівні й одночасно забезпечити вимоги до ресурсів і можливості поетапного розширення [7, 14]. Для специфікації тактичного рівня поведінки використовується термін агенти. Загальна структура розробленого програмного забезпечення системи управління АПА показана на рис. 1.

Система складається з трьох рівнів: виконавчого, тактичного та стратегічного.

Виконавчий рівень відповідає за управління рухом робота та виконання рефлекторних функцій. У своєму складі він має повний комплект компонентів інформаційно-вимірювальної та управляючої систем. Дизайн цього рівня дозволяє виконувати всі функції, що залежать від апаратного забезпечення конкретного робота та надає апаратно-незалежний інтерфейс для взаємодії з тактичним рівнем.

Тактичний рівень використовується для організації виконання наступного завдання, поставленого стратегічним рівнем. Він безпосередньо керує режимами та цілями

виконавчого рівня. Для цього на цьому рівні розміщується набір агентів та арбітр, який утримує управлінську структуру агентів для вирішення поточного завдання.

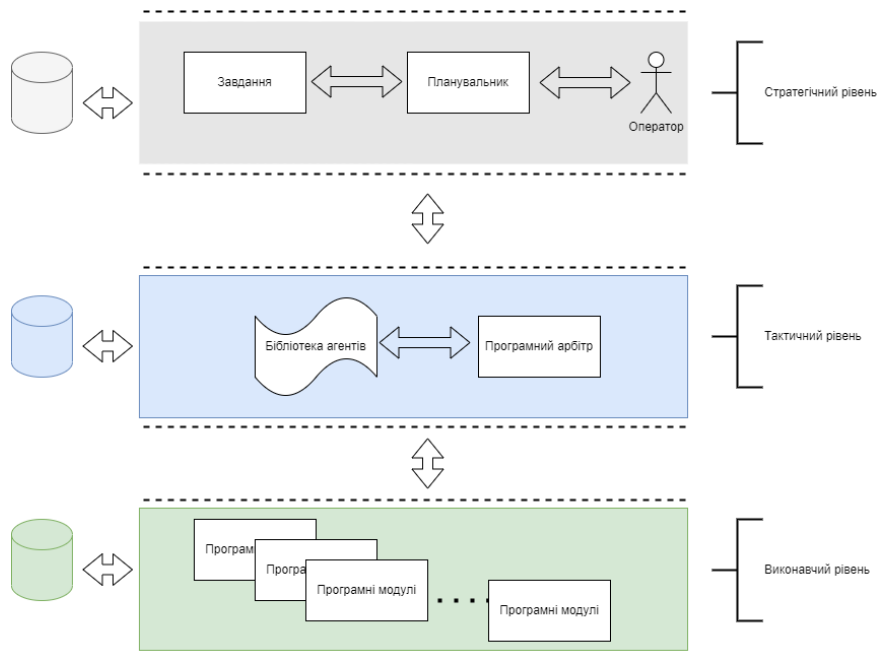


Рисунок 1 – Гібридна трирівнева архітектура програмного забезпечення АПА

Стратегічний рівень ієрархії представлений програмою-завданням, що містить опис цілей поточного завдання АПА. Для систематизації досягнення цілей у загальному випадку використовується планувальник.

Взаємодія між компонентами системи відбувається на базі моделі клієнт-сервер або з використанням абстрактних інтерфейсів, що реалізовані на основі розробленої програмної платформи, яка підтримує механізми подій та публікацій [15].

Розглянемо більш детально розроблені в цьому дослідженні принципи організації та алгоритми функціонування тактичного та виконавчого рівнів інформаційно-управляючої системи АПА (рис. 2).

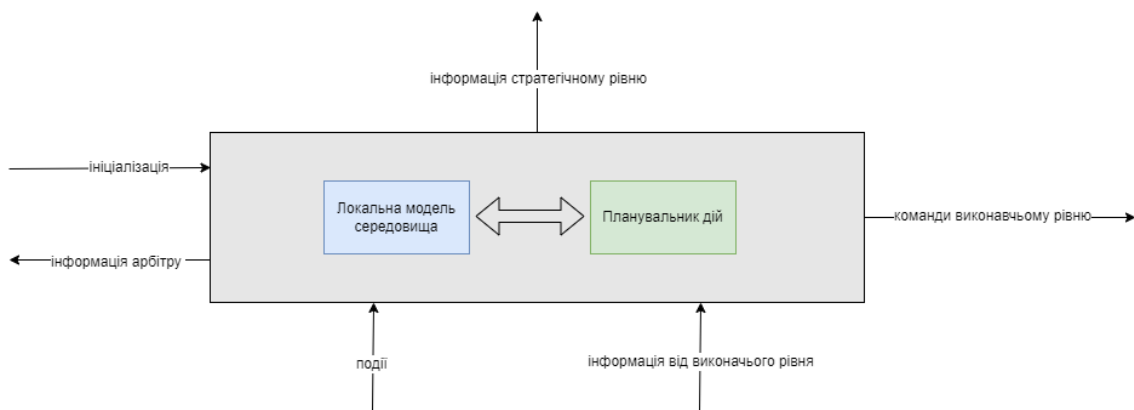


Рисунок 2 – Агентська структура тактичного рівня

Тактичний рівень системи складається з набору агентів, кожен з яких відповідає за вирішення конкретного аспекту завдання. Вхідними параметрами агента є опис завдання, що надійшов зі стратегічного рівня, а також необхідні дані з виконавчого рівня. Вихідним параметром є потік імперативних команд для виконавчого рівня. Агент має внутрішню структуру, яка складається з локальної моделі середовища, засобів планування дій на основі цієї моделі та аналізу вхідної та вихідної інформації для визначення працездатності агента.

Колекція агентів формується так, щоб будь-яке завдання цільового класу могло бути вирішено за допомогою комбінації та спільної роботи кількох елементів з колекції. Однією з

ключових проблем є вибір агента, необхідного для виконання поточного фрагменту завдання в даний момент. У класичному підході це завдання розв'язується на стратегічному рівні системи управління, що потребує наявності продукційної машини та значних обчислювальних потужностей. У запропонованому підході стратегічний рівень формує наступне завдання у вигляді списку агентів, необхідних для його вирішення. Список агентів передається на тактичний рівень разом з умовами їх активації. Таким чином, завдання тактичного рівня зводиться до створення, забезпечення функціонування та припинення дії зазначеної групи агентів.

Агент може перебувати в одному з кількох станів:

1. Активний: агент підтримує модель зовнішнього середовища в актуальному стані та формує списки команд для виконавчого рівня.

2. Пасивний: агент підтримує модель зовнішнього середовища в актуальному стані, але управління не формується.

3. Стан "помилка": агент повідомляє стратегічний рівень про неможливість виконувати свої функції. Цей стан виникає при помилкових вхідних даних або при виході з ладу керованих агентом виконавчих пристроїв.

Арбітр забезпечує непротиційне виконання агентів. Для цього він на основі поставленого завдання (тобто списку агентів) організовує зазначених агентів у багатопарову структуру управління (утворюючи шар 0). При цьому пріоритети кожного з агентів непрямо задаються на стратегічному рівні, виходячи з вкладеності завдань. До отриманої управляючої структури додається додатковий фіксований шар 1 з більш високим пріоритетом (рис. 3), що служить для організації реакції на події, не пов'язані з виконанням місії (обробка команд телеуправління). Таким чином, початковий план при виникненні незапланованих ситуацій може бути деталізований шляхом доробки його агентами зі шару 1.

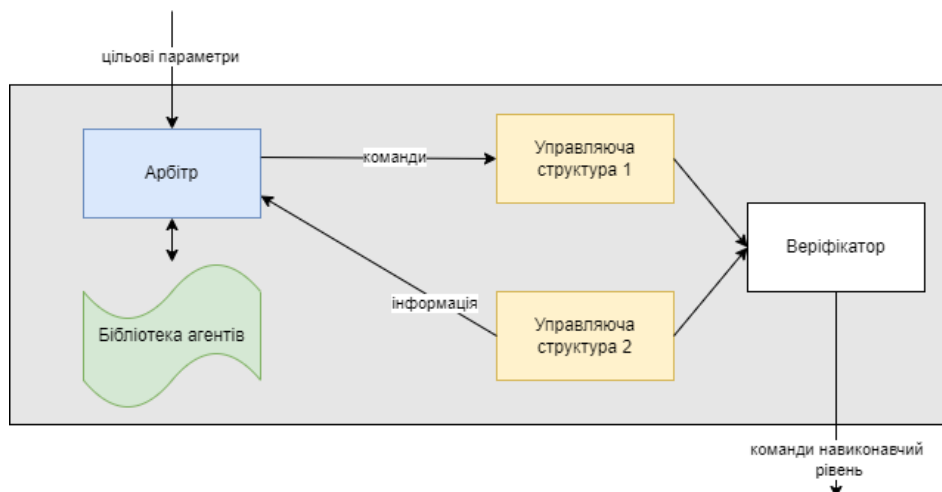


Рисунок 3 – Організація тактичного рівня

Тактичний рівень системи містить модель середовища, яка може змінюватися під час роботи шляхом збирання інформації від АПА. Це дозволяє ефективніше коригувати цільові точки під час переміщення.

Для завдання обстеження штучних протяжних об'єктів (ШПО) розроблено набір агентів, які забезпечують виконання повного циклу обстежувальних робіт. Ці агенти містять:

1. Типові покриття акваторії мережею курсів.
2. Виявлення та відстеження ШПО за допомогою різноманітних систем виявлення АПА.
3. Повторне обстеження попередньо перевірених об'єктів.
4. Обстеження виявлених під час обстеження чужих об'єктів.
5. Повернення до базування.

Показником присутності ШПО на основі даних n -ої системи виявлення АПА в часовий момент t є значення p_t^n , яке накопичує оцінки ймовірності існування контактів, що передують поточному часовому моменту:

$$p_t^{\Sigma n} = k^n p_{t-1}^{\Sigma n} + p_t^n, \quad (1)$$

де $p_t^{\Sigma n}$ – сумарне значення контактів до певного моменту часу t для підсистеми n ;
 k^n – коефіцієнт загасання для підсистеми n .

Багаторівнева структура тактичного рівня використовується для організації обстеження ШПО. Структура містить 3 рівні управління (рис. 4):

1. Реалізація шуканої траєкторії.
2. Обстеження ШПО.
3. Обстеження чужих об'єктів, що знаходяться близько до ШПО.

Рівні послідовно активуються (і пригнічують нижчі) по мірі виявлення ШПО та чужих об'єктів у його навколишній області.

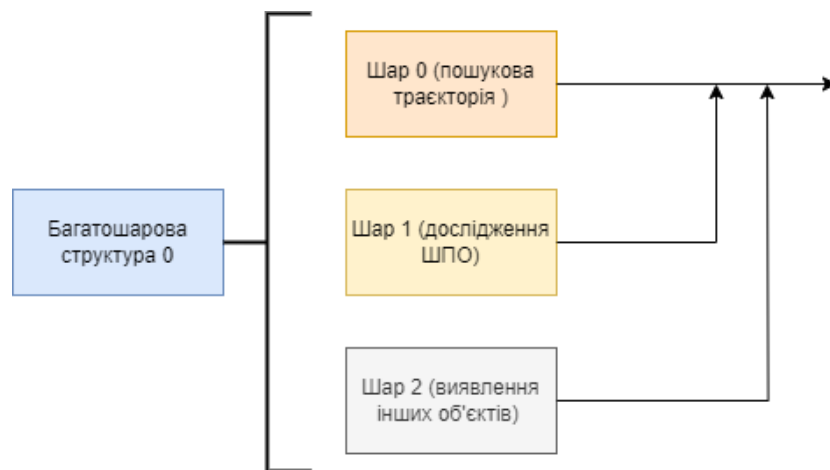


Рисунок 4 – Багаторівнева структура, що використовується для інспекції ШПО

Виконавчий рівень системи управління реалізується як реактивний інтерпретатор потоку команд від тактичного рівня. Він взаємодіє з тактичним рівнем за допомогою інтерфейсу, який містить повідомлення та команди різних типів (управління рухом та бортовою апаратурою, видача вимірних параметрів та обробка подій).

Організація цілеспрямованого руху недалеко від дна є одним з основних завдань виконавчого рівня. Такий рух організовується як комбінація двох елементарних поведінок: досягнення цільової точки та ухилення від перешкод [15, 16].

Виконавчий рівень також реалізує поведінки АПА, пов'язані із забезпеченням безпеки. Такі поведінки надаються системою контролю та аварійного реагування АПА, яка контролює стан бортових пристроїв, параметри руху АПА та точність виконання команд місії. Для ідентифікації аварійних ситуацій відстежуються розходження між моделлю відповідного процесу та його реалізацією. Ситуація вважається аварійною, якщо це розходження перевищує задані межі протягом встановленого інтервалу часу. У такому випадку використовується фіксована реакція системи типу "якщо-то".

Згідно з прийнятою методологією, на виконавчому рівні завдання, що керують однаковими виконавчими пристроями, об'єднуються в багаторівневу керуючу структуру з перевагою (домінуванням), наведену на рис. 5:

- стандартного руху;
- корекції руху (вибір одного з двох варіантів визначається цілями, встановленими тактичним рівнем);
- рефлекторних дій системи контролю та аварійного реагування.

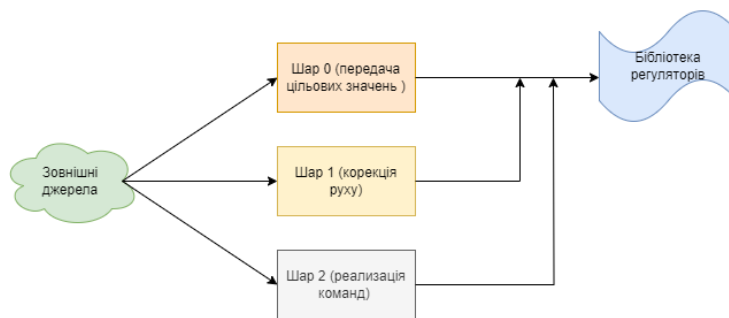


Рисунок 5 – Багаторівневі структури поведінки виконавчого рівня

Поведінкові особливості, втілені на виконавчому рівні та агентах тактичного рівня, у даній статті не розглядаються, що обумовлене бажанням систематично зосередитися на концептуальній побудові бібліотеки агентів тактичного рівня. Обрана стратегія дозволила глибше проаналізувати та обґрунтувати процес функціональної декомпозиції цільового класу завдань обстеження морських глибин та підводних операцій, що є ключовим етапом роботи.

Практична реалізація задекларованої мети містить такі етапи (рис. 6):

1. У першу чергу може бути розпочато процес розробки бібліотеки агентів, використовуючи концепції функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Це може включати створення архітектури програми, алгоритмів, методів інтеграції та тестування.

2. Після розробки бібліотеки агентів, вона потребуватиме тестування на різних сценаріях та завданнях, пов'язаних із обстеженням морських глибин та підводними операціями. Це включає перевірку роботи окремих агентів, їхню взаємодію та відповідність задекларованим функціям та вимогам.

3. Після тестування може виникнути необхідність в оптимізації або вдосконаленні роботи бібліотеки. Це може включати удосконалення алгоритмів, збільшення швидкості роботи, підвищення точності чи збільшення функціональності агентів.

4. Так як метою є застосування цієї бібліотеки в реальних умовах, то в подальшому планується впроваджувати її в системи підводних апаратів для тестування в реальних умовах. Це дозволить оцінити ефективність та придатність бібліотеки на практиці.

5. Після успішного завершення розробки, тестування та оптимізації, важливо документувати всі кроки та результати. Це може включати написання технічних звітів, статей або публікацію в наукових журналах для спільного використання зі спільнотою дослідників та фахівців у цій області.



Рисунок 6 – Структура процесу практичної реалізації задекларованої мети

Такий цикл розробки та впровадження може допомогти реалізувати заявлену мету та допомогти у покращенні ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконанні підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів.

Таким чином, стаття привносить значну наукову новизну шляхом побудови методологічного підходу до розробки та функціональної декомпозиції цільового класу завдань, який унікальним чином визначає складові елементи та взаємозв'язки між ними. Особливу цінність представляє можливість створення бібліотеки агентів тактичного рівня для вирішення завдань обстеження морських глибин та підводних операцій, що може відображати новаторський підхід до цієї проблеми та потенційно стати основою для подальших досліджень у цій сфері.

Висновки. Для розробки системи управління автономним підводним апаратом запропоновано нову архітектуру, яка використовує як ієрархічні, так і поведінкові управлінські структури. Це значно розширює можливості АПА, дозволяючи йому вирішувати завдання різних класів в умовах обмежених обчислювальних ресурсів бортової обчислювальної мережі.

У рамках запропонованої архітектури запропоновано використання поведінкового підходу на різних рівнях функціональної трьохрівневої архітектури системи управління. При цьому управлінські структури виконавчого рівня мають постійний склад, а на тактичному рівні формуються змінні структури, які створюються на основі розробленої бібліотеки агентів. Це забезпечує легке нарощування функціональності по мірі появи нових завдань та апаратних засобів.

Обґрунтовано підхід щодо побудови бібліотеки агентів тактичного рівня на основі функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Дії робота формуються в термінах агентів, що утворюють бібліотеку, що забезпечує основу для створення декларативних місій. Розроблена та досліджена структура агента, яка включає локальну модель середовища, засоби планування дій на базі цієї моделі та аналізу використовуваної інформації для визначення працездатності агента.

Таким чином, у статті пропонується досягнути підвищення ефективності обстеження морських глибин завдяки розробці нової архітектури системи управління підводним апаратом та використанню бібліотеки агентів тактичного рівня. Це в подальшому дозволить підвищити точність, швидкість та адаптивність процесу обстеження, забезпечивши апарату можливість ефективно реагувати на різноманітні умови підводного середовища. Разом з тим, важливо підкреслити, що стаття, як концептуального характеру, не призводить числові показники ефективності, але направлена на підвищення ефективності обстеження морських глибин та підводних операцій завдяки використанню нової архітектури та бібліотеки агентів тактичного рівня.

Перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження показали необхідність удосконалення системи управління автономними підводними апаратами при поглибленні вирішення більш складних завдань, а не тільки пошуку та обстеження.

Гостро постає питання щодо розширення класів вирішуваних завдань. Так, у ході подальших наукових досліджень автор готовий сфокусувати зусилля на розпізнаванні та класифікації об'єктів пошуку та ситуацій, що складаються у підводному середовищі, виявленні тенденцій розвитку обстановки, моделюванні поведінки певних об'єктів, які можуть складати небезпеку або загрозу.

Планується продовжити роботу щодо розширення переліку даних, що можуть бути задіяні для вирішення вище висвітлених завдань. Окремим питанням є удосконалення гнучкості системи управління автономними підводними апаратами за рахунок впровадження нових поведінкових алгоритмів, у тому числі з використанням інтелектуальних агентів. У рамках розробленої архітектури на тактичному рівні передбачається значне розширення запропонованої бібліотеки агентів, що значно підвищить нарощування функціональних

можливостей системи при виникненні нових завдань та удосконаленні апаратних засобів системи управління.

Крім того, слід зазначити у найближчій перспективі планується впровадити застосування окремих елементів штучного інтелекту при виконанні завдань планування місій і організації взаємодії апаратів з динамічно змінюваним оточуючим середовищем у підводному просторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Murphy R. R. Introduction to AI Robotics. Cambridge, MA : MITpress; 2019, 648 p.
2. Cashmore M., Fox M., Long D., Magazzeni D., Ridder B., Carrera A., Palomeras N., Hurtos N., Carreras M. Rosplan : Planning in the robot operating system. In : Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling. 2015. vol 25, pp 333–341.
3. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. AI technology for underwater robots. Springer, Cham, CH; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
4. Christensen L., de Gea Fernández J., Hildebrandt M. et al. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. Curr Robot Rep 3, 2022. p. 165–175.
5. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamic sand prototype test Advances in Mechanical Engineering 2017, Vol. 9(11), pp. 1–10.
6. Zhimin Liu, Xiaozhong Zhou. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot October 2019 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 649(1):012017 DOI: 10.1088/1757-899X/649/1/012017.
7. Thompson F., Guihen D. Review of mission planning for autonomous marine vehicle fleets. Journal of Field Robotics.2019;36(2):33–54. <https://doi.org/10.1002/rob.21819/>.
8. Panda M., Das B., Subudhi B., Pati BB. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles. Int J Autom Comput. 2020; 17(3). p. 321–352.
9. D. L. Li, P. Wang, L. Du. Path planning technologies for autonomous underwater vehicles-a review. IEEE Access, vol. 7, pp. 9745–9768, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888617.
10. Ali Jebelli, Mustapha C. E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. Kazemi Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller January 2013 International Review of Mechanical Engineering (IREME) 7(1): 147–153.
11. Ali Jebelli, M.C.E. Yagoub, B. S. Dhillon Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters International Journal of Robotics and Automation (IJRA) Vol. 5, No. 4, December 2016, pp. 284–294.
12. Moniruzzaman M., Islam SMS, Bennamoun M., Lavery P. Deep learning on underwater marine object detection : a survey. In: International conference on advanced concepts for intelligent vision systems. Springer; 2017. pp 150–160.
13. Roehr TM, Kirchner F. Spatiotemporal planning for a reconfigurable multi-robot system. In: Finzi A., Karpas E., editors. Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob). London; 2016. pp. 135–146.
14. Yuan J., Wang H., Zhang H., Lin C., Yu D., Li C. AUV obstacle avoidance planning based on deep reinforcement learning. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; 9(11):1166. <https://doi.org/10.3390/jmse9111166>.
15. Guo T., Jiang N., Li B.Y. UAV navigation in high dynamic environments : A deep reinforcement learning approach. Chin. J. Aeronaut. 2021, 34, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.011>.
16. Antonelli G. Underwater robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol 123. Springer International Publishing, Cham; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0>.

REFERENCES

1. Murphy, R. R. (2019). Introduction to AI Robotics. Cambridge, MA: MITpress; 648 p.
2. Cashmore, M., Fox, M., Long, D., Magazzeni, D., Ridder, B., Carrera, A., Palomeras, N., Hurtos, N., Carreras, M. (2015). Rosplan: Planning in the robot operating system. In: Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling. vol 25, pp 333–341.
3. Kirchner, F., Straube, S., Kühn, D., Hoyer, N. (2020). AI technology for underwater robots. Springer, Cham, CH; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
4. Christensen, L., de Gea Fernández, J., Hildebrandt, M. et al. (2022). Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. *Curr Robot Rep* 3, p. 165–175.
5. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng (2017). Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamic sand prototype test *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9(11), pp. 1–10.
6. Zhimin Liu, Xiaozhong Zhou (2019). Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot October 2019 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 649(1):012017 DOI: 10.1088/1757-899X/649/1/012017.
7. Thompson, F., Guihen, D. (2019). Review of mission planning for autonomous marine vehicle fleets. *Journal of Field Robotics*. 36(2): 33–54. <https://doi.org/10.1002/rob.21819/>.
8. Panda, M., Das, B., Subudhi, B., Pati, BB. (2020). A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles. *Int J Autom Comput*. 17(3). p. 321–352.
9. Li, D. L., Wang, P., Du, L. (2019). Path planning technologies for autonomous underwater vehicles—a review. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9745–9768. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888617.
10. Ali Jebelli, Mustapha, C. E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. (2013). Kazemi Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller January 2013 *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 7(1):147–153.
11. Ali Jebelli, M.C.E. Yagoub, B. S. (2016). Dhillon Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters *international Journal of Robotics and Automation (IJRA)* Vol. 5, No. 4, December, pp. 284–294.
12. Moniruzzaman, M., Islam SMS, Bennamoun, M., Lavery P. (2017). Deep learning on underwater marine object detection: a survey. In: *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*. Springer; pp 150–160.
13. Roehr TM, Kirchner, F. (2016). Spatiotemporal planning for a reconfigurable multi-robot system. In: Finzi A, Karpas E, editors. *Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob)*. London; pp. 135–146.
14. Yuan, J., Wang, H., Zhang, H., Lin, C., Yu, D., Li, C. (2021). AUV obstacle avoidance planning based on deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(11): 1166. <https://doi.org/10.3390/jmse9111166>.
15. Guo, T., Jiang, N., Li, B. Y. (2021). UAV navigation in high dynamic environments: A deep reinforcement learning approach. *Chin. J. Aeronaut*. 34, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.011>.
16. Antonelli, G. (2018). Underwater robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 123. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0>.

Kalinichenko Ye. V., Zaiets A. Yu. DEVELOPMENT OF BASIC APPROACHES TO ORGANIZING SOFTWARE FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES FOR SOLVING SURVEY TASKS

The aim of the article is to enhance the efficiency of surveying the ocean depths and performing various underwater operations by utilizing advanced mathematical frameworks in autonomous underwater vehicles. The article discusses the challenges in developing a control system for autonomous underwater vehicles, noting that existing control systems are primarily designed for search-based tasks, while these vehicles can be used for more complex operations such as surveying. To successfully address these tasks, autonomous underwater vehicles require a flexible control system capable of adapting to new tasks and data from onboard sensors. The article proposes a new architecture for the mathematical framework of the control system,

integrating both hierarchical and behavioral control structures. This significantly expands the capabilities of these vehicles, enabling them to tackle diverse tasks within the constraints of computational resources onboard. Within this proposed architecture, a behavioral approach is employed across different functional hierarchical levels of the control system. Notably, executive-level control structures maintain a constant composition, while variable structures are formed at the tactical level based on a developed library of agents, allowing for easy functionality expansion as new tasks and hardware emerge. The article justifies an approach for constructing a library of tactical-level agents based on the functional decomposition of the target task class. The actions of the agents forming the library are established, providing the groundwork for creating declarative missions. Furthermore, a researched agent structure containing a local environmental model, action planning tools based on this model, and an analysis of utilized information to determine agent operability is developed and investigated. This developed control system structure could be further proposed for testing on autonomous underwater vehicles.

Key words: *autonomous underwater vehicles; behavioural architecture; hierarchical architecture; hybrid architecture; coordination; conflicts; reliability; agents.*

© Калініченко Є. В., Заєць А. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 20.10.2023

УДК 656.61.052(045)

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ ПО ЗАДАНІЙ ТРАЄКТОРІЇ

Піпченко О. Д., д.т.н., доцент Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: nav.researches@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6878-0619;

Конон Н. М., аспірант, старший викладач Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: scientia.nk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4651-7622.

У даній роботі досліджуються проблеми та рішення автоматизації навігації суден, зосереджуючись на вдосконаленні автоматичних пристроїв і систем для контролю руху суден по заданій траєкторії. У статті наведено огляд сучасних математичних моделей, алгоритмів функціонування та методів їх реалізації, з точки зору їх впливу на ефективність систем контролю за траєкторією. Підкреслено потенційні обмеження певних методів впровадження та відповідну необхідність перегляду законів управління або пошуку нових підходів для параметричної та структурної ідентифікації процесу управління. Метою дослідження є удосконалення методів управління судном на заданій траєкторії. Представлені математичні залежності руху по прямолінійній та криволінійній траєкторіях. Встановлено залежності та зв'язки між заданим шляхом судна й динамічними параметрами, що використовуються для контролю слідування траєкторії судном. Ефективність представленого алгоритму управління судном по заданій траєкторії підтверджена імітаційним моделюванням руху на прикладі контейнеровозу типу S-175. У даній роботі, зокрема, наведені результати імітаційного моделювання як для прямолінійної складової заданого маршруту судна, так і для криволінійного відрізка маршруту, з урахування точки початку повороту та динамічної кутової швидкості судна для утримання судна на запланованій криволінійній траєкторії.

Ключові слова: безпека навігації; контроль утримання на траєкторії; автоматизовані судові системи; управління судном; маневрування судна; динамічні параметри руху судна.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.029–043

Вступ. Сучасні морські транспортні системи відіграють ключову роль у міжнародній торгівлі завдяки своїй економічній ефективності. Постійна необхідність удосконалення системи управління безпекою судноплавства в морській галузі підкреслюється необхідністю захисту людського життя, зменшення ймовірності надзвичайних ситуацій на морі та навігаційних небезпек, забезпечення захисту навколишнього середовища та уникнення несприятливих економічних наслідків, пов'язаних зі збитками від морських аварій та інцидентів.

Серйозні наслідки навігаційних аварій посилюються роллю людської помилки або «людського фактору» в роботі морських суден. Разом із удосконаленням технічного оснащення суден відбулося скорочення екіпажів, оскільки більша частина робочих процесів стала автоматизованою завдяки впровадженню інформаційних технологій, у тому числі навігаційних систем керування судном. Інформаційне перевантаження робітників на борту судна та психологічний стан людини в екстремальних ситуаціях мають бути враховані при розробці сучасних автоматизованих систем морської галузі з метою мінімізації прийняття хибних управлінських рішень.

Таким чином, у сучасному світі, рівень безпеки на судні, а саме навігаційна її складова, у більшій мірі залежить від ефективності прийняття рішень судовим і береговим персоналом у будь-яких навігаційних умовах. З метою підвищення контролю за прийнятими рішеннями, тематика автоматизованих систем навігації є затребуваною і актуальною.

Постановка проблеми. Відомо, що морський транспорт отримує широке застосування в різних сегментах міжнародних перевезень, зокрема в їх цивільному та комерційному напрямках, що зумовлюється, серед іншого, його економічною ефективністю для міжнародної торгівлі. У цьому аспекті, залишаються актуальними питання забезпечення безпеки морських перевезень та судноплавства. З точки зору забезпечення безпечної навігації та маневрування морських суден необхідними є вирішення задач керування їх

рухом, а саме удосконалення існуючих та розробка нових методів, засобів й систем у цьому контексті. Таким чином, обґрунтовується необхідність впровадження ефективних систем управління морським транспортом, зокрема для морських вантажних транспортних засобів.

У галузі автоматизації судноводіння продовжують залишатися актуальними задачі, пов'язані з удосконаленням автоматичних пристроїв та систем утримання судна на заданому курсі та заданій траєкторії руху. Якість роботи систем автоматичного управління оцінюється за такими показниками, як надійність, точність та швидкодія.

Досягнення необхідного рівня якості управління курсом та проходженням по траєкторії визначається не тільки принципами та законами, які лежать в основі синтезу математичних моделей та алгоритмів функціонування, але й способами реалізації отриманих алгоритмів. Однак деякі способи реалізації можуть накладати обмеження, які є неприйнятними згідно з вимогами до якості рівня управління судном. Таким чином, можна підкреслити потребу в перегляді існуючих законів управління, а також у розробці інноваційних підходів для забезпечення раціональної структури системи автоматичного руху по траєкторії (САРТ) [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують два потенційних рішення для контролю руху суден по заданій траєкторії: перше передбачає розробку контролера, який стабілізує помилки відстеження траєкторії, визначені неявними виразами, тоді як друге є більш поширеним підходом, в якому попередньо визначений заданий шлях є функцією параметризованої кривої. Системи керування морськими суднами на основі лінійних динамічних моделей є більш простими у реалізації. Ряд робіт присвячені відстеженню та керуванню траєкторією морських суден за допомогою лінійних або нелінійних методів, таких як класичне пропорційно-інтегрально-похідне керування, прогнозне моделювання керування з обмеженнями крену та методам керування на основі спостерігача. Також слід відзначити, що нелінійність й невизначеність моделей суден у поєднанні з впливом зовнішніх факторів часто заважають судну точно підтримувати свій курс уздовж заздалегідь визначеної траєкторії. У цьому контексті, для підвищення надійності замкненої системи зазвичай використовуються робастні та адаптивні методи керування [3].

Ковзний режим керування (SMC – sliding mode control) широко використовується в морських системах керування. Автори роботи [4] розробили інверсний закон SMC розглядаючи систему робастного відстеження траєкторії. Також у дослідженні [5] представлено нечіткий контролер рульового керування SMC, що враховує насичення вхідного сигналу системи авторульового.

Крім того, методології адаптивного та термінального SMC, а також методології SMC вищого порядку використовувалися для контролю орієнтації та контролю відстеження траєкторії автономних підводних апаратів. Ці схеми, як правило, інтегровані з алгоритмом зворотного кроку для контролю слідування по траєкторії суднами. У роботах [6, 7] був розроблений модифікований ПІ-регулятор із SMC режимом зворотного кроку для підтримки надійності системи керування траєкторією з невідомими параметрами. Однак усі ці методи обмежені необхідністю попереднього знання нелінійної гідродинаміки, тобто нелінійні компоненти моделі є відомими гладкими векторами функції швидкості, а параметри є невідомими сталими векторами з відомими розмірами.

На даний момент запропоновано кілька методів одночасного вирішення обмежень вхідних та вихідних сигналів. У роботі [8] досліджено проблему управління відстеженням траєкторії за умов асиметричних вхідних і вихідних обмежень, а також в умовах невизначеності. Для забезпечення обмежень на вихідні дані системи, були використані асиметричні логарифмічні бар'єрні функції та плавні диференційовані моделі функції помилки Гаусса при розробці контролера та для компенсації ефекту асиметричного насичення виконавчого механізму відповідно. Незважаючи на те, що ці методи стійкі до зовнішніх збурень і невизначеності моделі, вони не можуть бути застосовані безпосередньо для відстеження траєкторії надводних суден. Згодом у роботах [9–11] була розглянута подвійна проблема слідування траєкторії з обмеженнями вхідних та вихідних сигналів для суден, що підлягають

невизначеності моделі та зовнішнім збуренням. Запропонована схема системи керування базується на модифікації алгоритму наведення по лінії видимості (LOS – Line of Sight) [12, 17, 18] та інтегрує бар'єрну функцію Ляпунова, щоб утримувати помилки відстеження надводного судна в попередньо визначених межах продуктивності. Варто відзначити, що схема слідування по шляху, запропонована в [10, 11], незважаючи на надійність щодо невизначеностей і збурень, містить особливість у законі оновлення параметра шляху. Цей параметр є критичним для реалізації системи слідування. З метою покращення даної системи було проведено дослідження [13], у якому представлено робастну стратегію адаптивного керування, щоб змусити морське судно з параметричними невизначеностями та обмеженнями вхідних та вихідних сигналів слідувати заданою траєкторією. Таким чином, підхід не тільки використовує бар'єрну функцію Ляпунова для вирішення проблеми вихідної системи, але й залучує допоміжну систему проєктування для вирішення віртуальних і реальних вхідних насичень.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є удосконалення методів управління судном на заданій траєкторії. Задачі дослідження включають:

- 1) Встановлення вихідних умов та параметрів;
- 2) Визначення взаємозв'язків між заданим шляхом судна й динамічними параметрами, що використовуються для контролю слідування траєкторії судном;
- 3) Формування адаптованого алгоритму управління судном заданій траєкторії;
- 4) Проведення імітаційного моделювання з метою перевірки роботи алгоритму.

Виклад основного матеріалу. Для контролю маневрування судна по заданій траєкторії необхідною умовою є управління як курсом [1, 2], так і позицією. Метою управління позицією судна є мінімізація бічного відхилення XTD (cross-track distance), що визначається перпендикуляром опущеним з фіксованої точки на судні на лінію заданого маршруту (рис. 1).

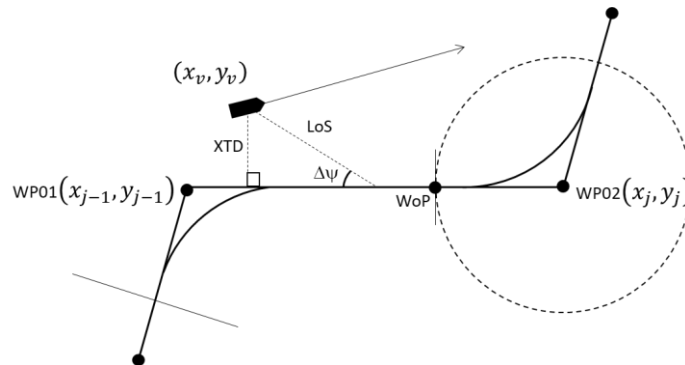


Рисунок 1 – Основні параметри маневрування судна по заданій траєкторії

У даній роботі розрахунки дистанцій та напрямків виконуються на площині, базуючись на думці, що точне маневрування судна є доцільним на відносно невеликих дистанціях. У разі навігації на великих дистанціях, чи необхідності досягнення більшої точності при розрахунках, доцільним є використання існуючих методів сферичної тригонометрії та рівнянь геодезичної прямої, представлених, наприклад, у роботах [14, 15]. В якості опорної точки для розрахунків, як правило, приймається CCRP (Consistent Common Reference Point) – стаціонарна загальна точка відліку.

Бічне відхилення може бути розраховане наступним чином:

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

$$\Delta x = (x_j - x_{j-1}); \Delta y = (y_j - y_{j-1}); \quad (2)$$

$$DTP = \sqrt{(x_v - x_{j-1})^2 + (y_v - y_{j-1})^2}; \quad (3)$$

$$DTG = \sqrt{(x_j - x_v)^2 + (y_j - y_v)^2} \quad (4)$$

де (x_v, y_v) – позиція заданої точки судна; (x_j, y_j) – j -та точка заданого шляху; DTP (Distance to Previous) – дистанція від поточної до попередньої точки маршруту; DTG (Distance to Go) – дистанція від поточної до наступної точки маршруту.

Для того, щоб запобігти поділу на нуль, треба перетворити вираз (2) наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} XTD &= \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 + 1}}, \text{ якщо } \Delta x \neq 0 \\ XTD &= (x_j - x_v), \text{ якщо } \Delta x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

XTD розрахований за формулою (5) буде мати вірний знак для пеленгів судна від поточної в наступну точку маршруту, тобто $BRG \in (0, 180^\circ)$.

Визначимо пеленг:

$$\Delta x_{vj} = (x_j - x_v); \Delta y_{vj} = (y_j - y_v) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} BRG &= \arcsin \Delta x_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \geq 0; \\ BRG &= \frac{\pi}{2} + \arcsin |\Delta y_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ BRG &= \pi + \arcsin |\Delta x_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ BRG &= \frac{3\pi}{2} + \arcsin \Delta y_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Звідси

$$\left. \begin{aligned} XTD &= \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ коли } BRG \in (0, 179^\circ) \\ XTD &= - \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ коли } BRG \in (180, 359^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Математична модель системи взаємозв'язку між судном, стерновою машиною та ПД-регулятору може бути характеризувана наступними залежностями (9) – (13):

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K \delta + K T_3 \dot{\delta}, \quad (9)$$

$$\psi = \int r dt, \quad (10)$$

$$\Delta \psi = \psi_3 - \psi, \quad (11)$$

$$\delta_3 = C_p \Delta\psi + C_d r, \quad (12)$$

$$\delta = \int \min \left\{ \max \left\{ \frac{\delta_3 - \delta}{T_\delta}, -\dot{\delta}_{\text{lim}} \right\}, \dot{\delta}_{\text{lim}} \right\} dt. \quad (13)$$

де T_1, T_2, T_3, K – відповідні коефіцієнти для моделі судна;
 r – кутова швидкість судна, рад/с;
 δ, δ_3 – поточний і заданий кути перекладки стерна, рад;
 $\dot{\delta}_{\text{lim}}$ – гранична швидкість перекладки стерна, рад/с;
 T_δ – постійна часу стернової машини;
 ψ, ψ_3 – поточний і заданий курси судна, рад;
 C_p, C_d – пропорційний і диференціальний коефіцієнти відповідно.

У роботі [16] запропоновано вводити додатковий елемент у рівняння (12), що має певний ваговий коефіцієнт. В цьому випадку, XTD буде представлено як пропорційна складова до закону управління, що несе додаткову нестабільність у загальну систему управління. Іншим підходом є додавання ще одного елемента, а саме швидкості наближення до заданого маршруту, у перпендикулярному напрямку до нього. Таким чином можна досягти більш стабільної поведінки системи та зменшення автоколиваний. Як результат, закон управління буде представлений у наступному вигляді:

$$\delta_3 = C_p \Delta\psi + C_d r + \int \Delta\psi dt + C_{pXTD} XTD + C_{dXTD} \dot{XTD} \quad (14)$$

З іншого боку, у разі коли різниця між пеленгом з поточної на наступну точку та курсом перевищує значення 90° (іншими словами судно прямує в протилежному напрямі) закон керування не зможе дозволити вивести судно на заданий маршрут.

Згідно до іншого підходу, відображеного у роботі [12], доцільним є використання лінії видимості (LoS – Line of Sight), яку показано на рис. 1. За цих умов закон управління курсом є незмінним, але заданий курс має поправку.

$$\psi_{3XTD} = \psi_3 + \Delta\psi_{XTD} \quad (15)$$

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

$$\Delta\psi_{XTD} = -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right) \quad (16)$$

Рівняння (16) має граничне значення при збільшенні дистанції до заданого відрізка траєкторії:

$$\lim_{|XTD| \rightarrow \infty} \Delta\psi_{XTD} = \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

Значення LoS залежить від розмірів судна, а також його маневрених характеристик. З цієї причини цю величину можна представити у певній кількості довжин судна, $LoS = n \times L$. Результати моделювання процесу утримання судна на заданому маршруті показав, що за умов тихої погоди, плавне повернення до траєкторії може досягатися при значенні $n \in (2,5)$.

Плавний вихід на задану траєкторію з більших дистанцій може бути забезпечений шляхом обмеження $\Delta\psi_{XTD}$, наприклад кутом 45° :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi_{XTD} &= -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| \leq \frac{\pi}{4} \\ \Delta\psi_{XTD} &= -\frac{\pi}{4} \text{sign}(XTD), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| > \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} (18)$$

З метою верифікації представленого алгоритму управління судном на заданій прямолінійній траєкторії, був використаний метод імітаційного моделювання. На рис. 2 та рис. 3 відображене виконання маневру повернення судна на траєкторію. Об'єктом управління є модель контейнеровоза типу S-175, що має наступні розміри: довжина – 175 м; ширина – 25,4 м; осадка – 8,5 м.

Кут перекладки стерна при моделюванні обмежений значенням 15°. Робота стерна оптимізована по кількості переключок (рис. 3), що досягається застосуванням адаптованого закону управління, представленого в роботах [1, 2]. У результаті судно виходить на задану траєкторію досить плавно та без автоколивань.

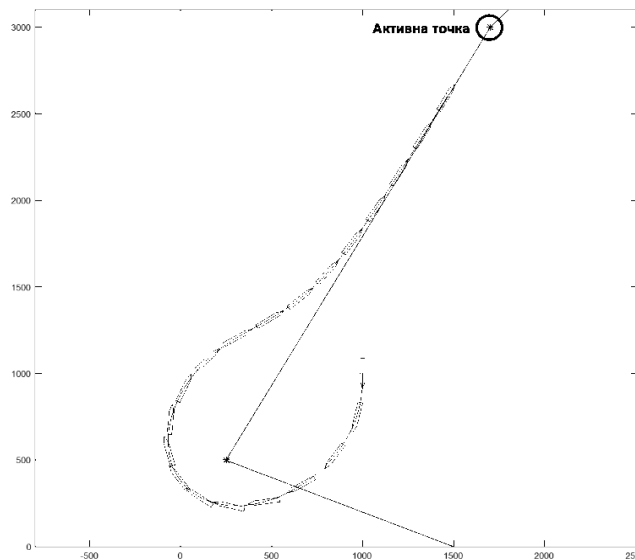


Рисунок 2 – Вихід в активну точку контейнеровозу S-175

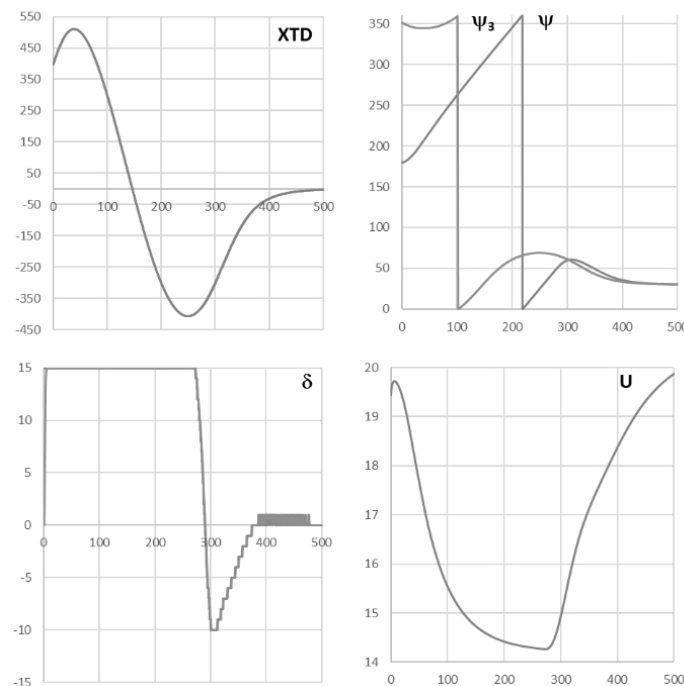


Рисунок 3 – Вихід в активну точку контейнеровозу S-175 – параметри

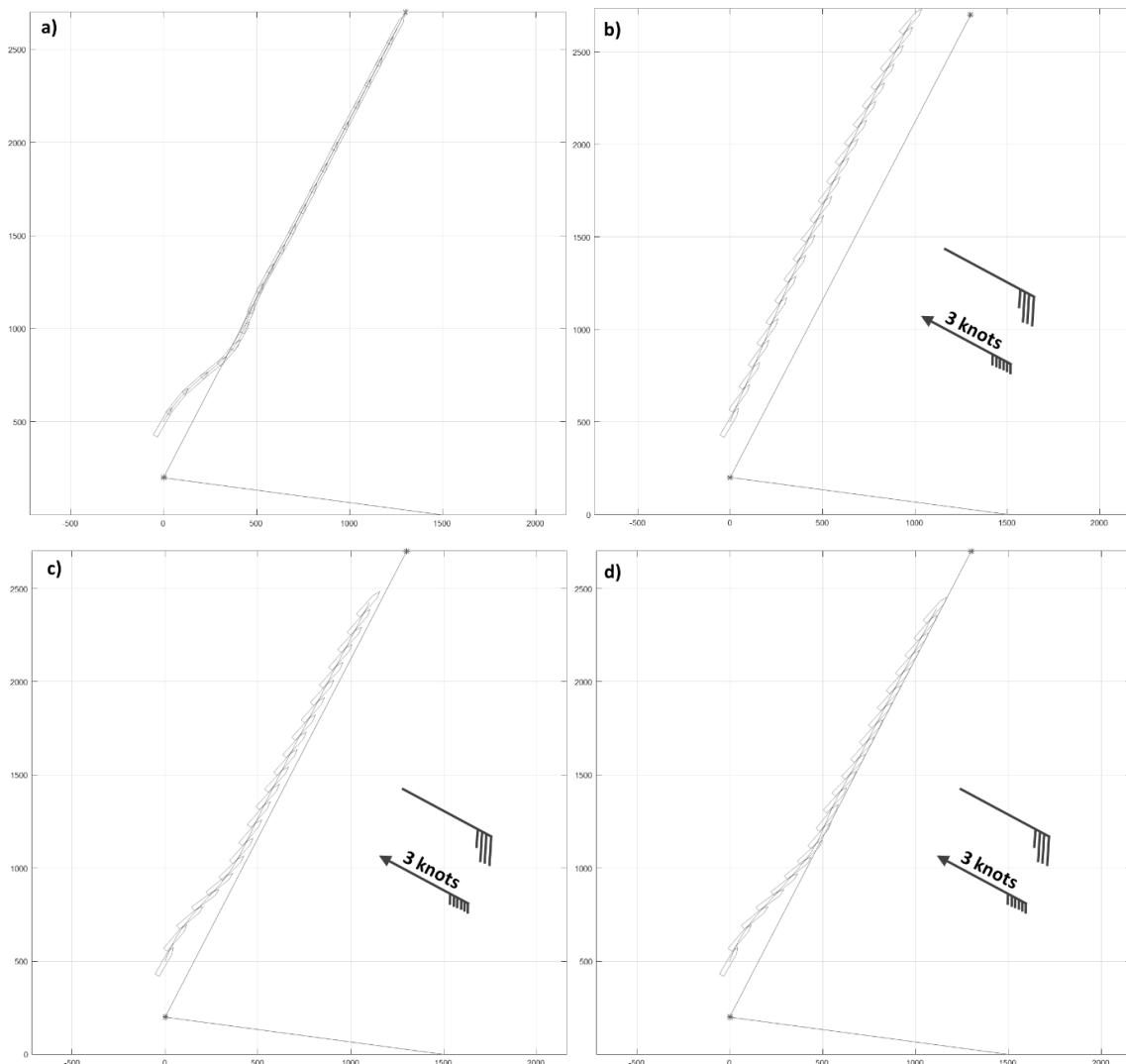


Рисунок 4 – Моделювання утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175 при швидкості 10 вузлів. Умови: а) тиха погода, 0-1 за шкалою Бофорта ($C_w = 1$); б) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ($C_w = 1$); в) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ($C_w = 2$); д) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ($C_w = 4$)

Вихід судна на траєкторію, та його подальше утримання за умов тихої з фіксованим значенням LoS відображена на рис. 4а. Управління з фіксованим значенням LoS не є ефективним за умов бортових збурень відносно значної сили (рис. 4 (б)), тому запропоновано застосовувати таке значення LoS , що змінюється динамічно в залежності від величини збурень і дистанції від маршрутного відрізка:

$$\left. \begin{aligned} LoS &= \max \left(\frac{1}{C_{w1}} L, C_{w2} \times |XTD| \right), \Delta\psi \leq \Delta\psi_{lim} \\ LoS &= nL, \Delta\psi > \Delta\psi_{lim} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

де $\Delta\psi_{lim}$ – різниця між заданим та фактичним курсами, при виході за границі якої значення LoS починає змінюватись у залежності від XTD .

Коефіцієнт C_{w1} задається пропорційно до погодних умов. Коефіцієнт C_{w2} визначає кут $\Delta\psi_{XTD}$, який по суті обчислюється як $\arctan\left(\frac{1}{C_{w2}}\right)$. Тобто при $C_{w2} = 2$, що відповідає результатам моделювання відображеного на рисунку 4, $\Delta\psi_{XTD} = 31,3^\circ$.

На рис. 5–7 показано параметри роботи САРТ під дією бортового вітру (швидкості вітру під час симуляції відображено на рис. 8) та течії швидкістю 2 вузли з різними величинами C_{w1} (1; 2; 4). На рис. 4 (d) та на рис. 7 видно, що збільшення C_{w1} до значення 4

призводить до зменшення значення XTD , але й також до збільшення амплітуди рискання судна навколо заданої лінії маршруту.

У контексті оптимізації слідування траєкторії судном та роботи стернового пристрою, при значенні $C_{wl} = 2$ досягається оптимальне управління. При відсутніх зовнішніх збуреннях, оптимальний рівень управління досягається при значенні $C_{wl} = 0,5$.



Рисунок 5 – Перекладки стерна в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

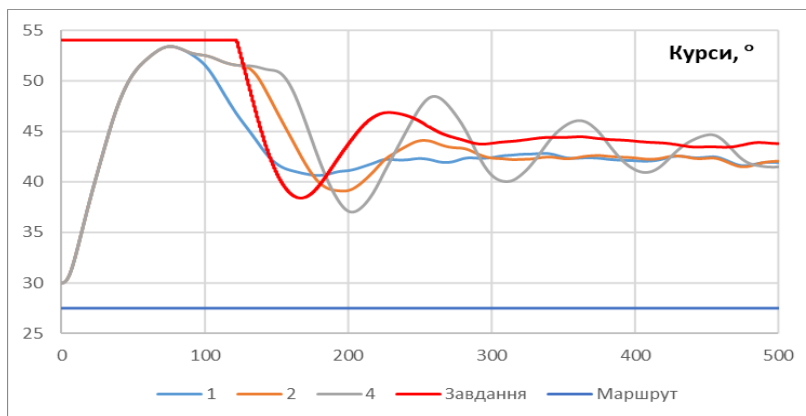


Рисунок 6 – Заданий та фактичний курси судна в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

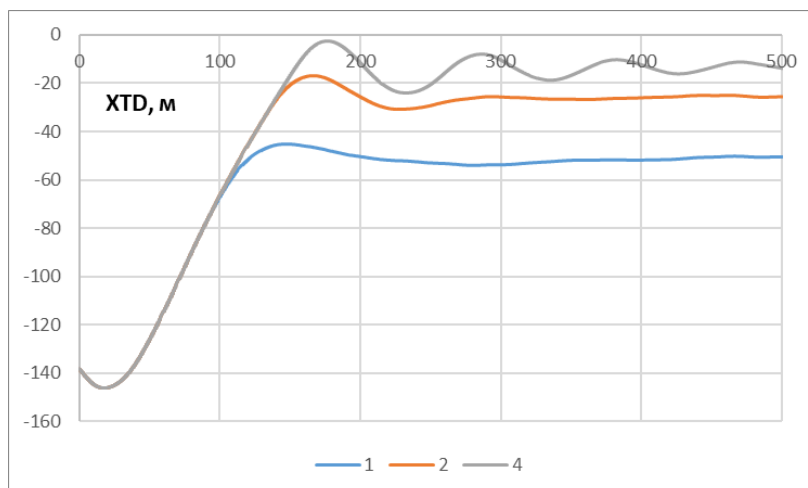


Рисунок 7 – Бокове відхилення від траєкторії в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

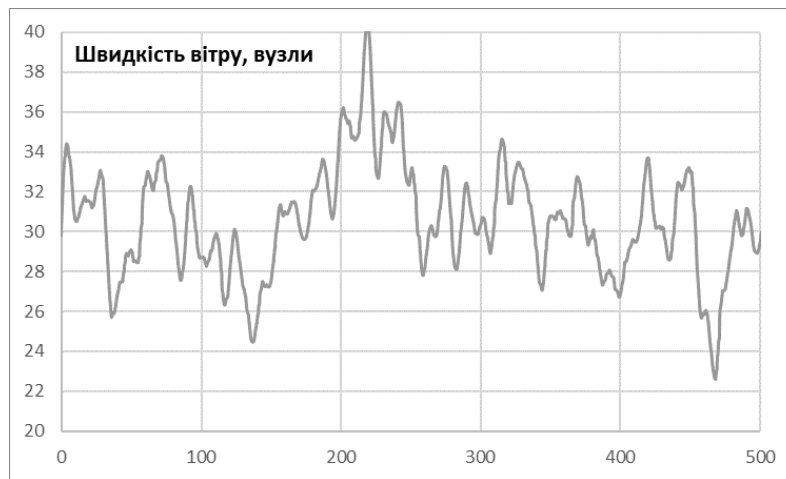


Рисунок 8 – Швидкість вітру в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

При слідуванні заданим маршрутом при зміні курсу судно рухається по криволінійній траєкторії, яка зазвичай представляє собою дугу з заданим радіусом. Для підтримання заданого радіуса, необхідним є контроль динамічного стану судна у процесі виконання повороту, тому в законі управління потрібно враховувати обмеження кутової швидкості.

Радіус повороту та кутова швидкість пов'язані залежністю:

$$r = \frac{U}{R} \tag{20}$$

де R – радіус повороту.

У результаті сумарне обмеження кутової швидкості автостернового може бути розраховано наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \Delta r &= \text{sign}(r) \cdot r_{lim} - r, \text{ при } |r| > r_{lim} \text{ та } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) = \text{sign}(r) \\ \Delta r &= 0, \text{ при } |r| < r_{lim} \text{ чи } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) \neq \text{sign}(r) \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

У сучасних умовах, підключення ЕКНІСУ до автостернового для маневрування судна по заданій траєкторії можливо практично напряду. Система дозволяє задавати довільні радіуси повороту, з деякими обмеженнями, які існують у залежності від встановленого програмного забезпечення.

Індикатором переходу судна від режиму утримання на прямолінійному відрізку маршруту до повороту – це така точка, що знаходиться на відстані від точки перетину дуги та прямолінійного відрізка і носить назву wheel-over point (WoP).

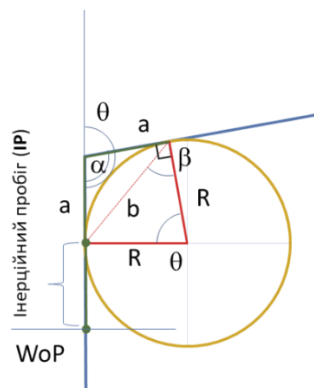


Рисунок 9 – Графічне відображення визначення WoP в залежності від заданого радіуса повороту

Щоб знайти точку початку повороту, тобто точки перетину прямолінійних відрізків заданого маршруту і дуги з заданим значенням радіуса R , необхідно опустити перпендикуляри з центру кола в точки дотику з прямолінійними відрізками. Утворений у

результаті цього чотирикутник має дві сторони рівні радіусу R і дві сторони рівні відстані від точки зміни маршрутного відрізка до дотичної з окружністю a . Цей чотирикутник можна розділити на два рівнобедрених трикутника із спільною основою b . Таким чином, кут θ може бути розрахований як $\theta = 180 - \alpha$, де α – різниця курсів. Спільна основа b дорівнює:

$$b = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (22)$$

Косинус кута при основі трикутника

$$\cos \beta = \frac{b}{2R} = \sin \frac{\theta}{2} \quad (23)$$

Таким чином, сторона

$$a = \frac{b}{2 \cos(90 - \beta)} \quad (24)$$

Після підстановки (22) і (23) у (24) та ряду перетворень отримаємо:

$$a = \left| \frac{R \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \left(90 - \arccos \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \right)} \right| \quad (25)$$

Тоді дистанція від точки зміни маршрутного відрізка до точки початку повороту визначається як

$$D_{WOP} = a + IP \quad (26)$$

Інерційний пробіг (IP) визначає відстань, що проходить судно, набираючи потрібну кутову швидкість. Він залежить від швидкості судна та кута перекладки стерна: $IP = f(U, \delta)$. На рисунку 10 представлена величина IP в різних режимах циркуляції судна. Зазвичай $IP \approx (1 \pm 0.25) \times L$, де L – довжина судна. IP зростає при збільшенні швидкості або зменшенні кута перекладки стерна.

Судно не завжди може опинитися точно в позиції точки початку повороту. Тому перехід до наступного відрізка траєкторії починається, якщо судно досягло кола з радіусом D_{WOP} (див. рис. 1). Під час руху по заданому колу алгоритм, описаний рівняннями (15) та (18), не дозволяє точно утримувати судно на заданій траєкторії. Ця проблема може бути вирішена шляхом сегментації криволінійної траєкторії на прямолінійні відрізки, використанням референс-моделі, динамічним обмеженням кутової швидкості, або комбінацією цих методів.

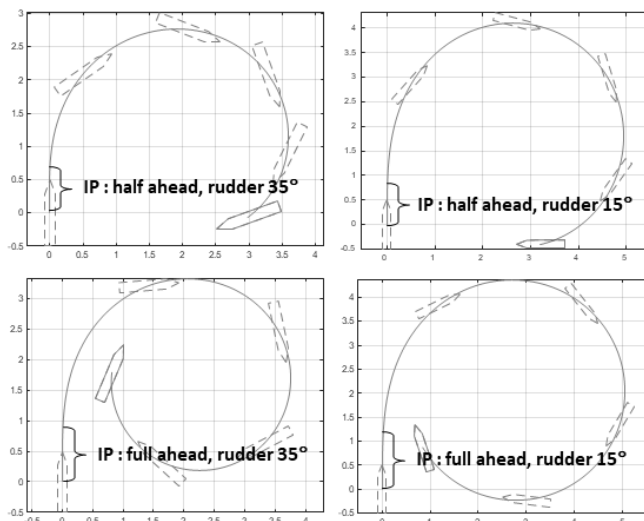


Рисунок 10 – Відображення інерційного пробігу судна на прикладі циркуляції контейнеровозу вантажомісткістю 10000 TEU на правий борт

Враховуючи зменшення поступової складової швидкості судна при виконанні повороту, згідно до виразу (17) також зменшується кутова швидкість, необхідна для утримання судна на радіусі R .

Таким чином, виникає необхідність в управлінні кутовою швидкістю з метою повернення судна на траєкторію, коли судно зміщується відносно центру дуги повороту.

Відстань від судна до центру дуги повороту може бути розрахована за допомогою рівняння:

$$R_v = \sqrt{(x_{Rj} - x_v)^2 + (y_{Rj} - y_v)^2}. \quad (27)$$

Координати центру дуги визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} x_{Rj} &= x_j - a_j \sin \psi_j + \text{sign}(\alpha) R_j \sin \left(\psi_j + \frac{\pi}{2} \right); \\ y_{Rj} &= y_j - a_j \cos \psi_j + \text{sign}(\alpha) R_j \cos \left(\psi_j + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Звідси задана кутова швидкість визначається як:

$$\begin{aligned} r_3 &= \text{sign}(\alpha_j) U \left(\frac{2}{R_j} - \frac{1}{R_v} \right), \text{ при } DTP \leq D_{WOP} \\ r_3 &= 0, \text{ при } DTP > D_{WOP} \end{aligned} \quad (29)$$

Траєкторія судна за САРТ у тиху погоду відображена на рис. 11. На рис. 12 та 13 відображено кутові швидкості та перекладки стерна відповідно. На рис. 14 відображено аналогічний процес управління при дії зовнішніх збурень спрямованих в одну сторону (вітру та течії).

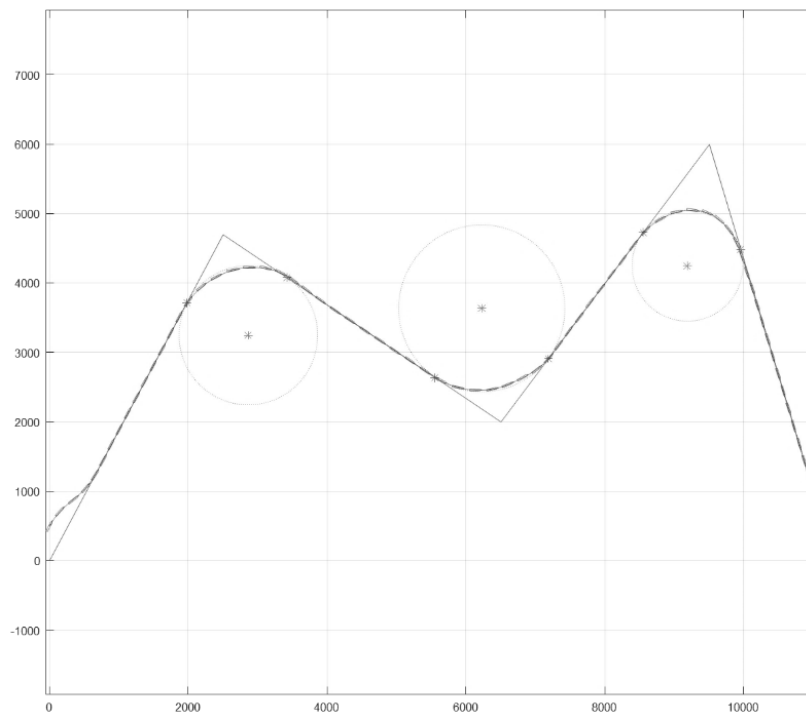


Рисунок 11 – Маневрування судна за заданою траєкторією у тиху погоду для моделі контейнеровозу S-175

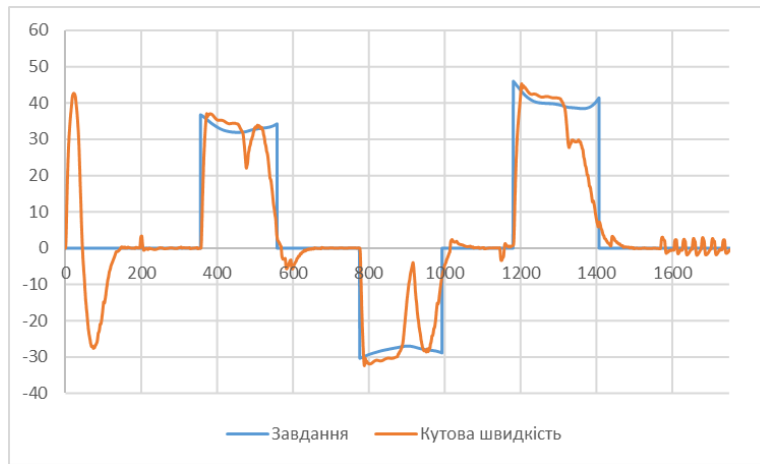


Рисунок 12 – Кутова швидкість, °/хв. Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175

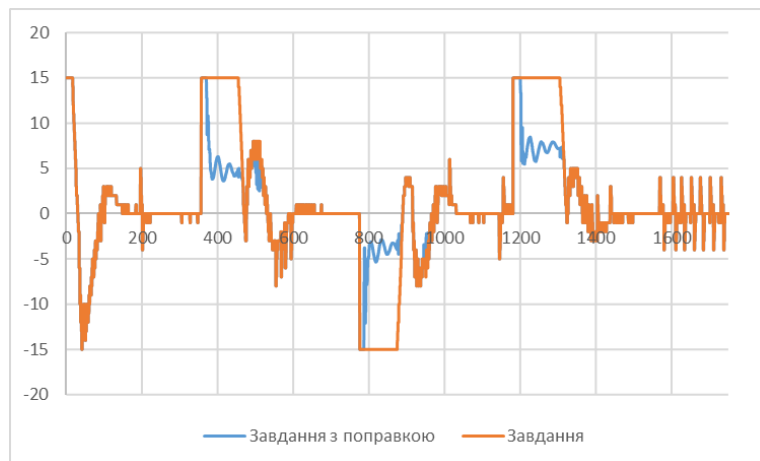


Рисунок 13 – Перекладки стерна, °. Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175

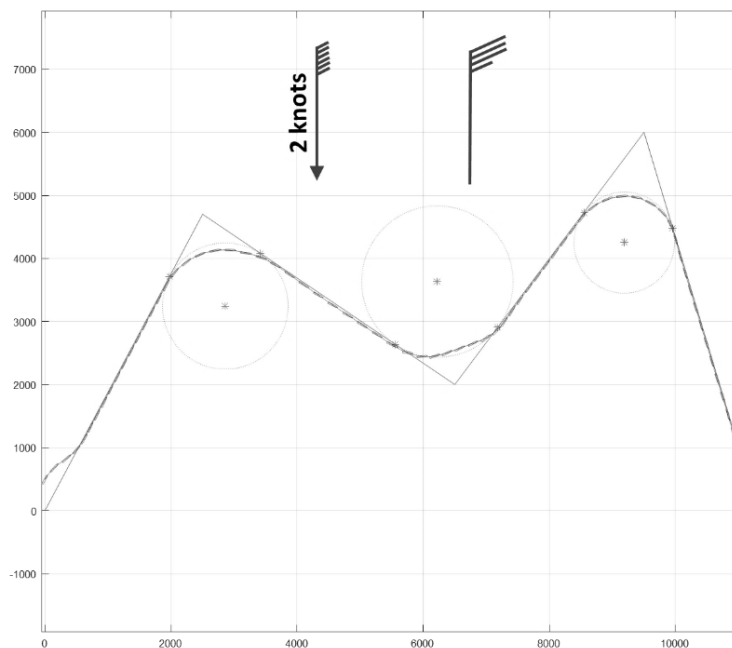


Рисунок 14 – Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175. Швидкість судна – 20 вузлів; вітер N, 8 за шкалою Бофорта (35 вузлів); течія S – 2 вузли

Висновки. У даному дослідженні, базуючись на аналізі сучасних методів та алгоритмів, що застосовуються при розробці систем для слідування траєкторії, було проведено математичне моделювання маневрування судна за заданою траєкторією з метою удосконалення існуючих методів та алгоритмів. У ході дослідження були визначені взаємозв'язки між маршрутом судна та необхідними динамічними параметрами для утримання судна на траєкторії. До таких параметрів можна віднести наступні: бокове зміщення судна, поточний і заданий курс, лінія видимості, точка початку повороту, інерційний пробіг, а також кутова швидкість. Для прямолінійного руху отримано оптимізований закон управління з урахуванням швидкості наближення до траєкторії у перпендикулярному до неї напрямку, що дозволяє отримати більш стабільну поведінку системи та зменшити автоколивання. Для підвищення ефективності підходу управління судна за лінією видимості, було запропоновано динамічно змінювати значення лінії видимості в залежності від зовнішніх збурень. Для криволінійного руху було представлено рівняння розрахунку заданої кутової швидкості, необхідної для контролю повороту судна. У результаті моделювання прямолінійного та криволінійного руху були складені відповідні алгоритми управління судном по заданій траєкторії. Верифікація результатів продемонструвала задовільні результати роботи запропонованих алгоритмів.

Перспективи подальших досліджень. У контексті перспективи подальших досліджень, а саме розвитку та покращення отриманих результатів слід наголосити на врахуванні впливу глибини під кілем судна на маневреність судна і, відповідно, на ефективність роботи представлених алгоритмів, а також на врахуванні індивідуальних особливостей властивих кожному типу судна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pipchenko O. and Shevchenko V., “K voprosu avtomatizirovannogo upravleniya sudnom na traektorii,” *Shipping & Navigation*, vol. 19, pp. 149–155, 2010.
2. Pipchenko O. and Shevchenko V., “Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions,” *Marine Intellectual Technologies - Scientific journal*, vol. 4, no. 04, pp. 208–214, 2018.
3. Liu Z., “Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 834–840, Jan. 2019, doi: 10.1049/iet-its.2018.5448.
4. Fu M., Shang W., and Wang T., “Robust Sliding Mode Control-Based Trajectory Tracking Control for an Underactuated Surface Vessel With Prescribed Performance,” *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, Jul. 2019, doi: 10.23919/chicc.2019.8865240.
5. Zhang G. et al., “A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV,” *Ocean Engineering*, vol. 151, pp. 82–92, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.054.
6. Sun Z., Zhang G., Yi B., and Zhang W., “Practical proportional integral sliding mode control for underactuated surface ships in the fields of marine practice,” *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 217–223, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.010.
7. Sun Z., Zhang G., Yang J., and Zhang W., “Research on the sliding mode control for underactuated surface vessels via parameter estimation,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 91, no. 2, pp. 1163–1175, Nov. 2017, doi: 10.1007/s11071-017-3937-8.
8. Zheng Z., Huang Y., Xie L., and Zhu B., “Adaptive Trajectory Tracking Control of a Fully Actuated Surface Vessel With Asymmetrically Constrained Input and Output,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1851–1859, Sep. 2018, doi: 10.1109/tcst.2017.2728518.
9. Zheng Z. and Feroskhan M., “Path Following of a Surface Vessel With Prescribed Performance in the Presence of Input Saturation and External Disturbances,” *IEEE/ASME*

Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 6, pp. 2564–2575, Dec. 2017, doi: 10.1109/tmech.2017.2756110.

10. Zheng Z. and Sun L., “Error-constrained path-following control for a stratospheric airship with actuator saturation and disturbances,” *International Journal of Systems Science*, vol. 48, no. 16, pp. 3504–3521, Oct. 2017, doi: 10.1080/00207721.2017.1381889.

11. Zheng Z., Sun L., and Xie L., “Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel With Actuator Saturation and Faults,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 10, pp. 1794–1805, Oct. 2018, doi: 10.1109/tsmc.2017.2717850.

12. Fossen T. I., “Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control,” Apr. 2011, doi: 10.1002/9781119994138.

13. Ghommam J., Ferik S. E., and Saad M., “Robust adaptive path-following control of underactuated marine vessel with off-track error constraint,” *International Journal of Systems Science*, vol. 49, no. 7, pp. 1540–1558, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207721.2018.1460412.

14. Karney C. F. F., “Algorithms for geodesics,” *Journal of Geodesy*, vol. 87, no. 1, pp. 43–55, Jun. 2012, doi: 10.1007/s00190-012-0578-z.

15. Vincenty, “Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations,” *Survey Review*, vol. 23, no. 176, pp. 88–93, Apr. 1975, doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88.

16. Lukomskij Yu. A., Peshekhonov V. G. and Skorohodov D. A., “Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov”, Uchebnik. SPb.: Elmor, 2002. 360 p.

REFERENCES

1. Pipchenko, O. and Shevchenko, V. (2010). “K voprosu avtomatizirovannogo upravleniya sudnom na traektorii,” *Shipping & Navigation*, vol. 19, pp. 149–155.

2. Pipchenko, O. and Shevchenko, V. (2018). “Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions,” *Marine Intellectual Technologies - Scientific journal*, vol. 4, no. 04, pp. 208–214.

3. Liu, Z. (2019). “Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 834–840, doi: 10.1049/iet-its.2018.5448.

4. Fu, M., Shang, W., and Wang, T. (2019). “Robust Sliding Mode Control-Based Trajectory Tracking Control for an Underactuated Surface Vessel With Prescribed Performance,” 2019 *Chinese Control Conference (CCC)*, doi: 10.23919/chicc.2019.8865240.

5. Zhang, G. et al. (2018). “A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV,” *Ocean Engineering*, vol. 151, pp. 82–92, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.054.

6. Sun, Z., Zhang, G., Yi, B., and Zhang, W. (2017). “Practical proportional integral sliding mode control for underactuated surface ships in the fields of marine practice,” *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 217–223, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.010.

7. Sun, Z., Zhang, G., Yang, J., and Zhang, W. (2017). “Research on the sliding mode control for underactuated surface vessels via parameter estimation,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 91, no. 2, pp. 1163–1175, doi: 10.1007/s11071-017-3937-8.

8. Zheng, Z., Huang, Y., Xie, L., and Zhu, B. (2018). “Adaptive Trajectory Tracking Control of a Fully Actuated Surface Vessel With Asymmetrically Constrained Input and Output,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1851–1859, doi: 10.1109/tcst.2017.2728518.

9. Zheng, Z. and Feroskhan, M. (2017). “Path Following of a Surface Vessel With Prescribed Performance in the Presence of Input Saturation and External Disturbances,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2564–2575, doi: 10.1109/tmech.2017.2756110.

10. Zheng, Z. and Sun, L. (2017). “Error-constrained path-following control for a stratospheric airship with actuator saturation and disturbances,” *International Journal of Systems*

Science, vol. 48, no. 16, pp. 3504–3521, doi: 10.1080/00207721.2017.1381889.

11. Zheng, Z., Sun, L., and Xie, L. (2018). “Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel With Actuator Saturation and Faults,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 10, pp. 1794–1805, doi: 10.1109/tsmc.2017.2717850.

12. Fossen, T. I. (2011). “Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control,” doi: 10.1002/9781119994138.

13. Ghommam, J., Ferik, S. E., and Saad, M. (2018). “Robust adaptive path-following control of underactuated marine vessel with off-track error constraint,” *International Journal of Systems Science*, vol. 49, no. 7, pp. 1540–1558, doi: 10.1080/00207721.2018.1460412.

14. Karney, C. F. F. (2012). “Algorithms for geodesics,” *Journal of Geodesy*, vol. 87, no. 1, pp. 43–55, doi: 10.1007/s00190-012-0578-z.

15. Vincenty (1975). “Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations,” *Survey Review*, vol. 23, no. 176, pp. 88–93, doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88.

16. Lukomskij, Yu. A., Peshekhonov, V. G. and Skorohodov, D. A. (2002). “Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov”, Uchebnik. SPb.: Elmor. 360 p.

Pipchenko O. D., Konon N. M. ENHANCEMENT OF SHIP HANDLING TECHNIQUES ALONG A PREDETERMINED TRAJECTORY

The current research examines the complexities and solutions associated with the automation of maritime navigation, focusing on the improvement of automatic devices and systems for controlling the movement along a given trajectory. This paper offers a comprehensive review of contemporary mathematical models, functioning algorithms, and their implementation methodologies, assessing their impact on the effectiveness of trajectory control systems. The potential limitations of certain implementation methods and the corresponding necessity to reassess control laws or to find novel approaches for the parametric and structural identification of the ship handling process are emphasized. The purpose of the research is to refine the methods employed in trajectory-based ship control. The study presents mathematical correlations of motion along linear and curved trajectories and establishes the interconnections between the vessel’s route and the required dynamic parameters for maintaining the ship on its trajectory. The research provides a clear and concise framework that facilitates the comprehension and application of trajectory-based maritime control. The efficiency of the proposed algorithm is confirmed through the simulation of the S-175 container ship’s movement, which not only enhances the value of the research but also lays a robust groundwork for prospective investigations in this field. Looking at future prospects in the field, the researchers plan to continue work in this direction, focusing on further improvement of ship trajectory control methods and studying new approaches to parametric and structural identification of the ship control process. They also plan to conduct further simulations to test the effectiveness of their algorithm and explore its potential applications in other areas of maritime shipping.

Key words: safety of navigation; trajectory control; automated ship systems; ship handling; ship manoeuvring; dynamic parameters of vessel motion.

© Піпченко О. Д., Конон Н. М.

Статтю прийнято
до редакції 14.11.2023

УДК 004.942:656.61.052

РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ СУДНА

Товстокорий О. М., к.т.н., завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

Зінченко С. М., д.т.н., доцент, професор кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Нагрибельний Я. А., д.пед.н., професор, декан факультету судноводіння, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: yar1507@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3266-5798;

Тимофєєв К. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtymofeev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159.

Просте відхилення стерна призводить до появи кутової швидкості обертання судна навколо центру обертання і одночасно бокової швидкості руху центру обертання. Такий складний рух судна важко усвідомити судноводієві та прийняти правильне рішення. Разом з тим, боковий та обертальний рухи можна замінити одним «чистим» обертанням судна навколо іншої точки – полюсу повороту. Знання положення центру обертання і полюсу повороту дозволяє зменшити область маневрування, що особливо важливо при маневруванні у стиснених водах. Метою роботи є визначення зміщення центру обертання відносно центру ваги/міделі шпангоуту на максимальній швидкості циркуляції судна. Дана мета досягається за рахунок порівняння положення полюсу повороту на стоячому судні, визначеному теоретично, і положення полюсу повороту на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, визначеному під час проведення експерименту на навігаційному тренажері. Так як положення полюсу повороту залежить лише від відносного плеча (між кермом і центром ваги/міделі шпангоутом) прикладання бокової сили, яке у обох випадках однакове, то виявлена різниця і буде зміщенням центру обертання. Результати проведених експериментів та виконаних розрахунків показують, що положення полюсу повороту, розраховане для стоячого судна, відрізняється від положення полюсу повороту циркулюючого з максимальною швидкістю судна на величину $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. На думку авторів, виявлена різниця пояснюється зміщенням центру обертання судна відносно центру ваги/міделі шпангоуту при наявності поздовжньої швидкості. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у експериментальному доведенні ефекту зміщення полюсу повороту та встановленні причини – зміщення центру обертання, у залежності від швидкості судна. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні ефекту зміщення центру обертання для зменшення області маневрування, що особливо важливо у стиснених водах.

Ключові слова: зміщення центру обертання; положення полюсу повороту; циркуляція судна; маневрування у стиснених водах.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.044–055

Вступ. Центр обертання і полюс повороту – дві особливі точки, які мають важливе значення при маневруванні судна. Відносно центру обертання судно має найменший момент інерції і тому обертається навколо нього. За наявності бокової швидкості, судно рухається лагом і обертається навколо центру обертання одночасно. Цей складний рух можна замінити «чистим» обертанням навколо іншої точки – полюсу повороту. Полюс повороту відраховується від центру обертання, який, у свою чергу, може зміщуватися відносно центру ваги/міделі шпангоуту, у залежності від швидкості судна. Знання положення центру обертання і полюсу повороту дозволить зменшити область маневрування судна, що є особливо важливим при маневруванні у стиснених водах. Тому дослідження, яким присвячена дана стаття, вирішують актуальну науково-технічну проблему.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивчення поведінки центру обертання і полюсу повороту раніше розглядалося багатьма авторами.

У книзі [1], для спрощеної моделі судна, авторами отримані аналітичні залежності положення полюсу повороту, як уявної точки обертання судна, від плеча прикладання бокової сили та побудовані графіки. У отриманих результатах плече прикладання бокової

сили та відповідне йому положення полюсу повороту відраховувалися від мідель шпангоуту, а не від центру обертання.

У роботі [2], на прикладі виходу судна із доку заднім ходом, автор показав, що використання існуючих на той час рекомендацій по керуванню судном призводить до навалу судна на стінку дока. Вважалося, що судно обертається навколо центру обертання, який при русі заднім ходом зміщується назад. Насправді ж, судно оберталося навколо полюсу повороту, який навпаки був зміщений вперед, що й приводило до навалювання судна на стінку дока. Також автором наведені цікаві міркування щодо центру обертання, який повинен знаходитися між центром тяжіння і центром бокового гідродинамічного опору (COLR), який зміщується у напрямку руху судна. Максимальне зміщення COLR, на думку автора, становить до 10% довжини судна. Автор також підкреслив, що центр обертання і полюс повороту – це два різні центри.

У роботі [3] автор зазначає, що концепція полюсу повороту, для вирішення задач маневрування суден, використовується вже близько 200 років. Проте, до цього часу існують хибні уявлення про полюс повороту, а саме: полюс повороту переміщується у напрямку руху судна; полюс повороту є центром обертання судна; полюс повороту миттєво переміщується; полюс повороту є точкою, відносно якої діють прикладені моменти. Насправді: положення полюсу повороту не залежить від поздовжньої швидкості судна; полюс повороту є уявним центром; полюс повороту переміщується поступово; полюс повороту не є фізичною сутністю. Автор наводить також формули визначення положення полюсу повороту, аналізує схеми обертання судна та наводить приклади використання полюсу повороту для маневрування судном.

Фундаментальні дослідження по керуванню судном наведені у книзі [4], зокрема, у розділі 7.2.4. Pivot Point показано сучасний стан уявлень про полюс повороту та його використання для керування судном.

У статті [5] автор аналізує положення центру обертання у залежності від дії зовнішніх факторів: поздовжнього руху судна, впливу вітру, відхилення керма, інерції обертання, впливу гребного гвинта для переднього і заднього руху судна. Як правило, – пише автор, – на судні, яке не має ходу відносно води, центр обертання знаходиться по іншій бік мідель шпангоуту від прикладеної бокової сили (у даному випадку під центром обертання автор, очевидно, має на увазі полюс повороту). Кермо або інша поперечна сила, що діє в кормовій частині судна, утворює центр обертання попереду міделя. На прикладі танкера на рівному кілі у вантажі розглянуто вплив поздовжньої швидкості судна на положення центру обертання. Два буксири однакової потужності знаходяться на однаковій відстані від мідель шпангоуту і штовхають танкер лагом. Поки судно не має ходу ні вперед, ні назад, результатом зусиль буксирів буде чистий поперечний рух судна. Як тільки судно почне рухатись відносно води, виникає розворот судна. Рух судна вперед зміщує центр бокового опору і центр обертання вперед, що призводить до зменшення плеча носового буксира та збільшення плеча кормового буксира відносно центру обертання. Рух судна назад зміщує центр обертання назад, та обертання судна у протилежному напрямку.

У статтях [6, 7] автор перелічує основні положення традиційної теорії полюсу повороту та наводить роботи авторів, починаючи з 2008 р., у яких заперечуються ці положення. Зокрема, наведені та проаналізовані статті: к.д.п. Х. Ков'є (H. Cauvier); доктора Сон-Гі Сео (Seong-Gi Seo), серпень 2011 р. та грудень 2016 р., доктора Сон-Гі Сео (Seong-Gi Seo) і М. Мішу (M. Mishu), жовтень 2011 р.; доктора та к.д.п. П. Бутусіна (P. Butusina), жовтень 2011 р.; професора Те-Гвеон Чон (Tae-Gweon Jeong), липень 2012 р.; Х. Е. Карреньо (J. E. Carreno), грудень 2012 р.; П. Перера (P. Perera), січень 2015 р.; А. Недельку (A. Nedelcu et. al.), січень 2018 р.; доктора К. Бенедикт (K. Benedict), липень 2020 р. Автор зазначає, що на думку згаданих вчених центром фізичного обертання судна є центр бокового гідродинамічного опору, який може зміщуватися у напрямку руху судна.

У роботі [8] розглянуті питання впливу центру ваги, центри обертання та полюсу повороту на точність прогнозування лінійного та кутового руху судна, з метою підвищення безпеки розходження.

У статті [9] автор зазначає, що розуміння основ поведінки полюсу повороту є вкрай важливим для правильного розуміння поведінки судна. Полюс повороту – це уявна точка на судні, яка рухається по круговій траєкторії по периметру кола повороту судна при розвороті. Знання положення точки повороту в ситуації маневрування забезпечує оператора судна інформацією про геометрію руху. Під час циркуляції оператор відчуває комбінований ефект бокового руху від дрейфу і повороту, що створює хибне враження обертального руху навколо видимого центру, який і називається полюсом повороту. Для визначення положення полюсу повороту автором проведено натурний експеримент на судні *Rapatah* з гвинтом правого обертання та фіксованим кроком. Телеграф встановлено у положення «half astern». Для зручності аналізу весь експеримент було поділено на 8 часових інтервалів. Для кожного інтервалу обчислювалося середнє положення полюсу повороту. Експеримент показав, що положення полюсу повороту було на відстані приблизно 17% довжини судна від носа. Наведені фото експерименту.

У статті [10] автор зазначає, що полюс повороту використовується для опису маневреності та керованості суден. Це не справжній центр обертання судна, а видимий. Геометрично полюс повороту можна визначити як точку на круговій траєкторії, навколо якої рухається судно під час циркуляції. З полюсу повороту рух носової та кормової частини судна виглядає як «чисте» обертання. Положення полюсу повороту використовується операторами судна як допоміжний інструмент визначення зовнішніх сил, що діють на судно. Також положення полюсу повороту можна оцінити по розміру області маневрування. Якщо полюс повороту розташований не на мідель шпангоуті, а в носовій або кормовій частині судна, область маневрування збільшиться у чотири рази. Положення полюсу повороту залежить від точки прикладання бокової сили, наприклад, при застосуванні носових та кормових підрулюючих пристроїв, дії буксирів, тощо. Полюс повороту рухається не миттєво, а повільно, у залежності від зміни гідродинамічних сил, що діють на судно. Для судна, що знаходиться у спокої на рівному кілі, положення полюсу повороту співпадає із мідель шпангоутом. Для судна, що рухається вперед на рівному кілі, полюс повороту також зміщується вперед і на максимальній швидкості зміщується на 25% довжини судна вперед від мідель шпангоуту. Для судна, що рухається назад, полюс повороту також зміщується назад і на максимальній швидкості заднього ходу зміщується на 25% довжини судна в корму. На положення полюсу повороту впливають також такі фактори як прискорення, геометрія та швидкість судна, можуть відігравати важливу роль у визначенні положення точок повороту.

У статті [11] розроблено уточнену схему розрахунку положення полюсу повороту, із врахуванням центру обертання, досліджено схему керування із носовим та кормовим підрулюючим пристроєм, знайдено лінії керувань, на яких реалізується заданий рух судна (навколо полюсу повороту, без бокової швидкості, без кутової швидкості), досліджено коефіцієнт розподілу керувань та точки розриву функції, знайдені керування для точок розриву, знайдені оптимальні керування.

У статті [12] розглянуті питання автоматичного керування обертанням одногвинтового конвенційного судна навколо полюсу повороту без дрейфу. Для лінеаризованої моделі судна досліджені можливості двох схем керування – з носовим підрулюючим пристроєм та без носового підрулюючого пристрою. Для кожної схеми отримано зв'язок між керуваннями, які забезпечують рух судна без дрейфу. Отримані результати перевірені на стенді імітаційного моделювання у замкнутому контурі «Імітатор бортового контролеру – Моделі судна навігаційного тренажеру *Navi Trainer 5000*».

У статті [13] розглянуті питання використання концепції полюсу повороту для керування конвенційним одногвинтовим судном. Актуальність задачі полягає в необхідності зменшення площі маневрування одногвинтових конвенційних суден, які мають низьку маневреність, а їх частка в загальній кількості суден перевищує 85%. Недоліком існуючих

підходів до розрахунку положення полюсу повороту було використання спрощеної схеми розрахунку «центр ваги – полюс повороту», яка не враховувала залежність положення полюсу повороту від положення центру обертання. У статті, для конвенційного одnogвинтового судна отримано формулу та графіки положення полюсу повороту відносно фіксованої точки на корпусі судна (центру тяжіння/мідель шпангоуту) для уточненої розрахункової схеми «центр ваги – центр обертання» – полюс повороту». Отримані формули та графіки можуть бути використані як при ручному, так і при автоматичному керуванні рухом судна. Для двох розглянутих розрахункових схем проведено математичне моделювання руху конвенційного одnogвинтового судна в замкнутому контурі «Об’єкт керування – система керування». Результати моделювання показали, що використання уточненої розрахункової схеми дозволяє на 23% точніше оцінити траєкторію судна та необхідну площу маневрування.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є визначення зміщення центру обертання відносно центру ваги/мідель шпангоуту на максимальній швидкості циркуляції судна. Дана мета досягається за рахунок порівняння положення полюсу повороту на стоячому судні, визначеному теоретично, і положення полюсу повороту на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, визначеному під час проведення експерименту на навігаційному тренажері. Так як положення полюсу повороту залежить лише від відносного плеча (між кермом і центром ваги/мідель шпангоутом) прикладання бокової сили, яке у обох випадках однакове, то виявлена різниця і буде зміщенням центру обертання.

Основна частина. Для проведення подальших обчислень визначимо зв’язану із судном систему координат (ЗСК). ЗСК розташована у центрі ваги судна, вісь OX_1 ЗСК лежить у діаметральній площині, паралельна палубі і направлена у носову частину судна. Вісь OY_1 перпендикулярна осі OX_1 , паралельна палубі судна і направлена в сторону правого борту. Вісь OZ_1 доповнює систему до «правої».

Визначення положення полюсу повороту на стоячому судні. У роботі [2] авторами знайдена залежність між відносним положенням полюсу повороту \bar{X}_{nn} і відносним плечем бокової сили \bar{X}_p

$$\bar{X}_p = \frac{\frac{1}{6} \bar{X}_{nn}^4 - \frac{1}{4} \bar{X}_{nn}^2 - \frac{1}{32}}{\frac{2}{3} \bar{X}_{nn}^3 + \frac{1}{2} \bar{X}_{nn}} \quad (1)$$

Залежність (1) також представлена у вигляді графіка, рис. 1.

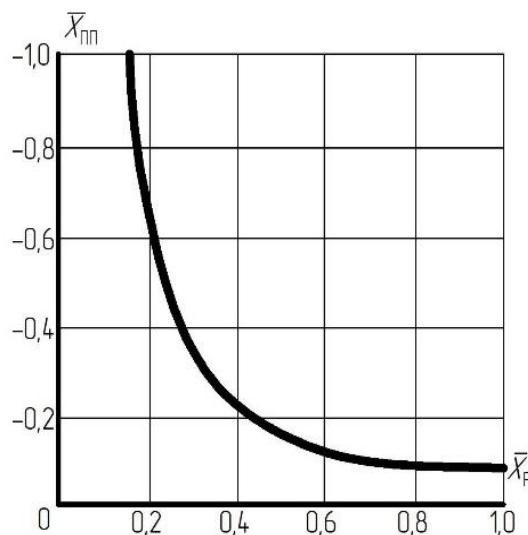


Рисунок 1 – Графік залежності відносного положення полюсу повороту від відносного плеча бокової сили

Користуючись наведеними авторами формулами і графіком, отримуємо, що на стоячому судні, для відносного плеча бокової сили $\bar{X}_p = 0,5$, відносна положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{nn} = -0,17$. Для знаходження формул і побудови графіку автори використовували систему координат, розташовану у центрі ваги судна / на мідель шпангоуті, вісь OX_1 якої направлена в сторону корми. У заданій нами системі координат, ці значення відповідно будуть $\bar{X}_p = -0,5$ та $\bar{X}_{nn} = 0,17$.

Розглянемо інший метод визначення взаємозв'язку між точкою прикладання бокової сили і положенням полюсу повороту, оснований на використанні лінеаризованої моделі реального судна. Відомо, що положення абсциси полюсу повороту визначається за формулою:

$$X_{nn} = -\frac{V_y}{\omega_z} \quad (2)$$

Для визначення бокової V_y та кутової ω_z швидкості судна, запишемо лінеаризовану систему бокового та кутового руху судна, до якого прикладена бокова сила F_y на відстані X_p від ЦО

$$\begin{cases} (m + \lambda_{22})\dot{V}_y = F_y - \frac{\partial R_y}{\partial V_y} V_y, \\ (I_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z = F_y X_p - \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z \end{cases} \quad (3)$$

де $m + \lambda_{22}$ – маса судна з приєднаними масами води;

$I_z + \lambda_{66}$ – момент інерції судна з приєднаними масами води у каналі рискання;

$\frac{\partial R_y}{\partial V_y}$ – коефіцієнт чутливості бокового опору корпусу судна до зміни бокової швидкості;

$\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}$ – коефіцієнт чутливості гідродинамічного моменту опору обертанню до зміни кутової швидкості.

Для усталеного руху ($\dot{V}_y = 0, \dot{\omega}_z = 0$), із системи (3) знаходимо:

$$V_y = \frac{F_y}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y}\right)}, \quad \omega_z = \frac{F_y X_p}{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}\right)} \quad (4)$$

Після підстановки усталених значень бокової та кутової швидкості із рівнянь (4) у рівняння (2), отримуємо формулу визначення положення ПП відносно ЦО при прикладанні бокової сили F_y на відстані X_p від центру обертання

$$X_{nn} = -\frac{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}\right)}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y}\right)} \frac{1}{X_p}, \quad (5)$$

У відносних величинах рівняння (5) матиме вигляд

$$\bar{X}_{nn} = -\frac{1}{L^2} \frac{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}\right)}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y}\right)} \frac{1}{\bar{X}_p}, \quad (6)$$

де L – довжина судна.

На рис. 2 наведено графік залежності відносного положення полюсу повороту \bar{X}_{nn} від відносного плеча прикладання бокової сили \bar{X}_p , побудований для судна OSV3-АН. Для зручного порівняння із рис. 1, дані наведені у тій же системі координат, що й на рис. 1.

Значення гідродинамічних коефіцієнтів $\frac{\partial R_y}{\partial V_y} = 25,9e^4$, $\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} = 2.16e^8$, що використовуються у формулі (6), взяті із статті [8].

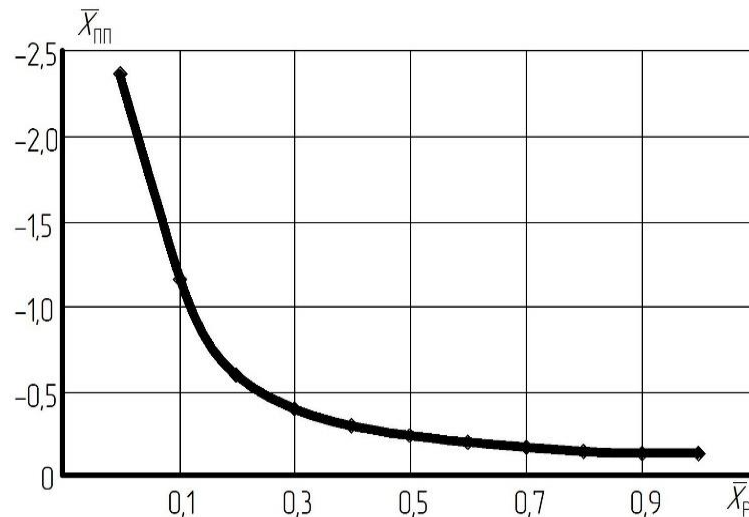


Рисунок 2 – Залежність положення полюсу повороту від плеча бокової сили для судна OSV3-АН

Як видно із результатів обчислення формули (6) та наведеного графіка, для відносного плеча прикладання бокової сили $\bar{X}_p = 0,5$ відносно положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{nn} = 0,232$.

Визначення положення полюсу повороту на судні, що рухається. Для визначення положення полюсу повороту на судні, що рухається, було проведено чотири експерименти на навігаційному тренажері Navi Trainer 5000 [13, 14]. Для першого та другого експериментів обрана модель судна OSV3-АН з конвенційною схемою розташування керма та рушіїв і одним носовим підрулюючим пристроєм. Водотоннажність судна 5291 т, довжина 80,4 м, ширина 18,0 м, осадка 6,6 м, максимальна швидкість 16,3 вузла. Двигун середньо-обертовий дизель 2x6166 кВт з двома гвинтами регульованого кроку (ГПК). Для третього та четвертого експериментів обрана модель судна Ro-Ro passenger ferry 13 з конвенційною схемою розташування керма та рушіїв і одним носовим підрулюючим пристроєм. Водотоннажність судна 7796,8 т, довжина 125,0 м, ширина 23,4 м, осадка 5,3 м, максимальна швидкість 20,5 вузлів. Двигун середньо-обертовий дизель 2x4000 кВт з двома гвинтами регульованого кроку. Перший експеримент. Модель судна OSV3-АН. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма переключені на правий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 15,51$ вузол. Скриншот CONING-дисплею під час проведення першого експерименту наведено на рис. 3.

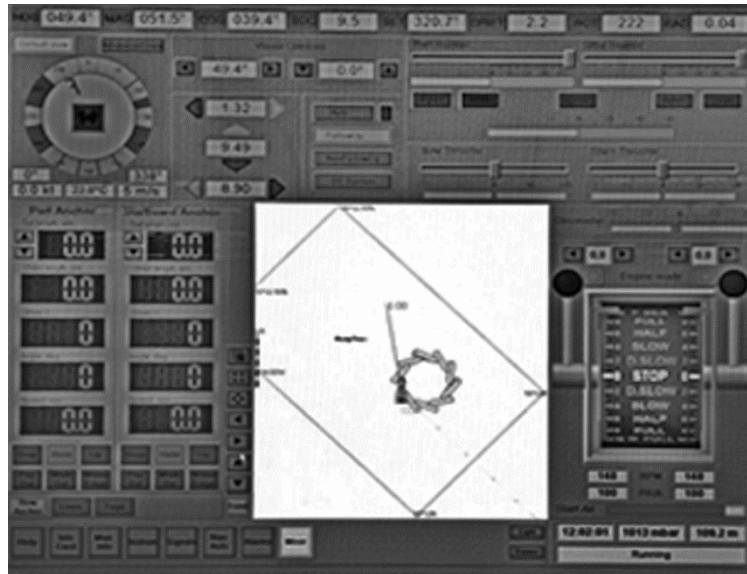


Рисунок 3 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення першого експерименту

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,49$ вузли, тангенційна швидкість носа $V_n = 1,32$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = -8,9$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту знайдемо за формулою, наведеною у роботі [15]

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{-V_n}{V_k - V_n} (\bar{X}_B - \bar{X}_A) + \bar{X}_A, \quad (7)$$

де $\bar{X}_{\text{пн}}$ – відносне значення абсциси полюсу повороту у ЗСК, \bar{X}_B – відносне положення керма (координати кормового перпендикуляру у ЗСК), \bar{X}_A – відносне положення носового перпендикуляру у ЗСК.

Після підстановки вимірянних тангенційних швидкостей та координат \bar{X}_A, \bar{X}_B у формулу (7), отримуємо

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{-1,32}{-8,9 - 1,32} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,37.$$

Другий експеримент. Модель судна OSV3-АН. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на лівий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 15,82$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення другого експерименту наведено на рис. 4.

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,14$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = -1,34$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = 8,81$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{1,34}{8,81 + 1,34} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,368.$$

Середнє зміщення полюсу повороту на середній швидкості $V_x = \frac{9,49 + 9,14}{2} = 9,32$ вузла, для

судна OSV3-АН, становить $\frac{0,371 + 0,368}{2} \approx 0,37$.

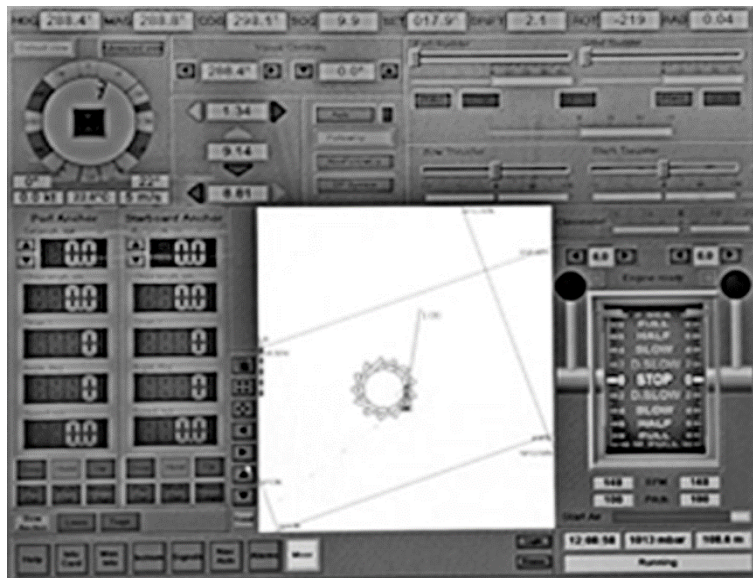


Рисунок 4 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення другого експерименту

Третій експеримент. Модель судна Ro-Ro passenger ferry 13. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на правий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 20,18$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення третього експерименту наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення третього експерименту

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,41$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = 0,97$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = -8,63$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{m}} = \frac{-0,97}{-8,63 - 0,97} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} = 0,399.$$

Четвертий експеримент. Модель судна Ro-Ro passenger ferry 13. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на лівий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 20,35$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення четвертого експерименту наведено на рис. 6. Як видно із наведеного скриншоту,

на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,41$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = -1,98$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = 10,91$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{min}} = \frac{1,98}{10,91 + 1,98} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,346$$

Середнє зміщення полюсу повороту на середній швидкості $V_x = 9,41$ вузла для судна Ro-Ro passenger ferry 13 становить $\frac{0,399 + 0,346}{2} \approx 0,37$.



Рисунок 6 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення четвертого експерименту

Основні результати та їх обговорення. Із отриманих результатів видно, що для різних типів суден відносне значення положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{\text{min}} \approx 0,37$. Різниця між відносним положенням полюсу повороту, визначеним на стоячому судні, і відносним положенням полюсу повороту, визначеним на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, становить $\Delta\bar{X} = 0,37 - 0,17 = 0,2$, або $\Delta\bar{X} = 0,37 - 0,23 = 0,14$. Отримана різниця пояснюється наступними міркуваннями.

1. Графіки, наведені на рис. 1 і рис. 2, отримані для стоячого судна, що не має поздовжньої швидкості.

2. Поява поздовжньої швидкості приводить до зміщення центру обертання в сторону руху судна, а отже, і полюсу повороту, який відраховується від центру обертання.

3. Отримана різниця $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$ між положеннями полюсу повороту на стоячому і циркулюючому судні і є зміщення центру обертання на максимальній швидкості циркуляції судна.

Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що авторами експериментально доведено зміщення полюсу повороту на максимальній швидкості циркуляції, а також висказано припущення, що причиною зміщення полюсу повороту є зміщення центру обертання. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися для усіх типів суден.

Висновки. Результати проведених експериментів та виконаних розрахунків показують, що положення полюсу повороту, розраховане для стоячого судна, відрізняється від положення полюсу повороту циркулюючого з максимальною швидкістю судна на величину $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. На думку авторів, виявлена різниця пояснюється зміщенням

центру обертання судна відносно центру ваги/мідель шпангоуту при наявності поздовжньої швидкості. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у експериментальному доведенні ефекту зміщення полюсу повороту та встановленні причини – зміщення центру обертання у залежності від швидкості судна. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні ефекту зміщення центру обертання для зменшення області маневрування, що особливо важливо у стиснених водах.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути пов'язані із експериментальним підтвердженням отриманої авторами раніше залежності між зміщенням центру обертання і швидкістю судна [11] для всього допустимого діапазону швидкостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Керування судном / С. І. Дьомін та ін.; під редакцією В. І. Снопкова. М.: Транспорт, 1991, 359 с.
2. Cauvier H. The Pivot Point. *The PILOT*. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. 2008, Vol. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
3. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.10, Issue 4, pp. 605–612. 2016. doi: 12.12716/1001.10.04.09.
4. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, *Norwegian university of science and technology*, Wiley, 2021.
5. Центр обертання і його переміщення, 2018. <https://sea-man.org/tsentr-vrashheniya-sudna.html>.
6. Cummins T. A. Review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation' Where is the centre of a ship's rotation? *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
7. Cummins T. A. Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong! *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
8. Nedelcu A., Lupu S., Toma A., Clinci C. Ship Maneuvering Prediction based Pivot Point Estimation, *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXI, 2018, pp. 81-86. doi: 10.21279/1454-864X-18-I2-008.
9. Capt. Santosha K. N. A Corrected Version on Positioning of Pivot Point, *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
10. Shafran D. What is the pivot point of ship? Fully explained !, *Maritime page*. 2023. <https://maritimepage.com/pivot-point-of-ship/>.
11. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I., Kyrychenko K. Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. *Ships and offshore structures*. 2022, Vol.18, Issue 3, pp. 358–364. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.
12. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprionov O., Petrovskyi A., Ivanov A., Tymofeiev K. Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022, 6(2(68), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
13. Zinchenko S, Kobets V., Tovstokoryi O., Kyrychenko K., Nosov P, Popovych I. Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel, *CEUR-WS.org*, Vol.3513, p.130–140, 2023 (ICST-2023).
14. Navi Trainer Professional 5000 (Version 5.35). Instructor Manual, 2014. Transas.

15. Tovstokoryi O. M. Moiseienko V. S. Keruvannia polozhenniam poliusu povorotu na dvohvyntovomu konventsionomu sudni // Naukovyi visnyk KhDMA. 2017, №2(17), s.101–109.

REFERENCES

1. D'omin, S. I., Zhukov, Je. I. & Kubachov, N. A. (1991). Keruvannja sudnom; pid redakcijeju V. I. Snopkova. M. : Transport.

2. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.

3. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, pp. 605-612. doi: 12.12716/1001.10.04.09.

4. Fossen, T. I. (2021). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley.

5. Tsentr obertannia i yoho peremishchennia. (2018). <https://sea-man.org/tsentr-vrashheniya-sudna.html>.

6. Cummins, T. A. (2020). Review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation' Where is the centre of a ship's rotation? Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.

7. Cummins, T. A. (2020). Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong! Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.

8. Nedelcu, A., Lupu, S., Toma, A. & Clinci C. (2018). Ship Maneuvering Prediction based Pivot Point Estimation, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXI, pp. 81–86. doi: 10.21279/1454-864X-18-I2-008.

9. Capt. Santosha, K. N. (2020). A Corrected Version on Positioning of Pivot Point, Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.

10. Shafran, D. (2023). What is the pivot point of ship? Fully explained! Maritime page. <https://maritimepage.com/pivot-point-of-ship/>.

11. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., & Kyrychenko, K. (2022). Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. Ships and offshore structures, 18(3), 358–364. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.

12. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Saprionov, O., Petrovskiy, A., Ivanov, A. & Tymofeiev K. (2022). Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. Technology audit and production reserves, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.

13. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Kyrychenko, K., Nosov, P. & Popovych, I. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel, CEUR-WS.org (ICST-2023), Vol.3513, P.130–140.

14. Navi Trainer Professional 5000 (Version 5.35). Instructor Manual, 2014. Transas.

15. Tovstokoryj, O. M. & Mojsenjenko, V. S. (2017). Keruvannja polozhennjam poljusu povorotu na dvohvyntovomu konvencionomu sudni, Naukovyj visnyk KhDMA, №2 (17), 101–109.

Tovstokoryi O. M., Zinchenko S. M., Nahrybelnyi Ya. A., Tymofeiev K. V. CALCULATION OF THE VESSEL'S ROTATION CENTER DISPLACEMENT

A simple deflection of the rudder leads to the appearance of the angular rate of the vessel rotation around the rotation center and at the same time the lateral speed of movement of the rotation center. Such a complex movement of the vessel is difficult for the shipmaster to understand and make the right decision. At the same time, lateral and rotational movements can be replaced by one "pure" rotation of the vessel around another point - the pivot point. Knowing the position of the rotation center and the pivot point position allows us to

reduce the maneuvering area of the vessel, which is especially important when maneuvering in compressed waters. The purpose of the work is to determine the rotation center displacement relative to the center of gravity/middle of the frame at the maximum speed of the vessel's circulation. This aim is achieved by comparing the position of the pivot point on a stationary vessel, determined theoretically, and the position of the pivot point on a vessel circulating at maximum speed, determined during an experiment on a navigation simulator Navi Trainer 5000. Since the position of the pivot point depends only on the relative arm (between the steering wheel and the center of gravity/middle frame) of the lateral force application, which is the same in both cases, the detected difference will be the displacement of the center of rotation. The results of the conducted experiments and performed calculations show that the position of the pivot point, calculated for a stationary vessel, differs from the position of the pivot point of a vessel circulating at maximum speed by an amount of $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. According to the authors, the detected difference is explained by the displacement of the ship's center of rotation relative to the center of gravity/middle frame in the presence of longitudinal speed. The theoretical significance of the obtained results consists in experimentally proving the effect of the displacement of the pivot point and establishing the cause - the displacement of the center of rotation, depending on the speed of the vessel. The practical value of the obtained results is to use the effect of the displacement of the center of rotation to reduce the maneuvering area, which is especially important in compressed waters.

Key words: rotation center displacement; pivot point position; vessel circulation; maneuvering in compressed waters.

© Товстокорий О. М., Зінченко С. М., Нагрибельний Я. А., Тимофєєв К. В.

Статтю прийнято
до редакції 14.10.2023

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ПОКАЗНИКИ ВИКОНАННЯ МАНЕВРУ «ЗИГЗАГ»

Шумило О. М., к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна, e-mail: shumylo.alexander@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Мета досліджень – розробка методу оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електроходів на маневрені показники. Методика. При маневруванні всі складові пропульсивних комплексів працюють у перехідних режимах, суттєво впливаючи один на одного. Обґрунтовано комплексний підхід до побудови методу оцінки показників маневрування. В основу аналізу закладено математичну модель перехідних режимів суднових пропульсивних комплексів. Використані основні положення теорії динамічної подоби. Результати. Знайдено критерії динамічної подоби, які суттєво впливають на показники маневрування. Розроблено метод оцінки показників якості виконання маневру «зигзаг». Проведено порівняльний аналіз впливу подовження корпусу електрохода на основні показники якості маневрування. Показано, що зі збільшенням довжини судна до 10% основні показники, відповідно зі Стандартами маневреності, не погіршуються. Показники роботи електроенергетичної установки не перевищують допустимі межі. Подовження, з метою економічної доцільності, корпусу судна в зазначених межах допустиме. Наукова новизна. Основні положення, які використані під час побудови методу, забезпечують його універсальність. Перехід до узагальнених безрозмірних параметрів дозволяє охопити дослідженнями великий клас суден. Практична значимість. Розроблений метод розрахунку дає можливість оцінювати ступінь відхилення показників маневреності електроходів при введенні додаткових вставок у корпус судна. З'являється можливість прогнозувати маневрені якості модернізованих суден. Бібл. 15 табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електроходу; моделювання перехідних режимів; маневр «зигзаг»; показники якості маневрування; вплив довжини корпусу.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.056–068

Вступ. За останні 30 років у всьому світі спостерігається позитивна тенденція у розвитку круїзної галузі [1–6]. Відслідковується зростання кількісних показників перевезення – більше ніж 22,2 млн пасажирів на рік. Тенденція щодо збільшення пасажиропотоку, згідно прогнозам експертного середовища, буде залишатися і в найближчому майбутньому.

Зростання пасажиропотоку, у перш за все, може бути задоволено [6] спорудженням нових круїзних суден. Відповідно до цього, останнім часом підвищився попит на будівництво нових великих круїзних лайнерів. Усього за два десятиліття (1988...2009 рр.) довжина найбільших круїзних суден збільшилася на третину (з 268 до 360 м), ширина їх збільшилася майже вдвічі (з 32,2 до 60,5 м), загальна кількість пасажирів також зросла вдвічі (з 2744 до 5400), а тоннаж зріс утричі (з 73 000 GT до 225 000 GT).

Разом з тим слід відмітити, що круїзі лайнери є надзвичайно коштовними спорудами [1–6]. Наприклад, усереднена вартість побудови круїзного лайнера з пасажиромісткістю від 1000 до 2000 пасажирів орієнтовно становить 442 млн дол. США, а вартість судна на 5000 пасажирів і більше – досягає 1,310 млн дол. США. Крім високої вартості спорудження таких суден, швидкому задоволенню попиту ринку перешкоджає значно більша, у порівнянні з транспортними суднами, тривалість їх будівництва – у середньому 1,5 роки.

Альтернативні стратегічні рішення щодо задоволення попиту круїзної галузі, це – модернізація флоту. Модернізація є потужним інструментом збільшення конкурентоспроможності як самих суден, так і галузі взагалі. Модернізація зменшує рівень морального і фізичного старіння суден. Вона має суттєві переваги перед спорудженням нових суден: з одного боку покращує техніко-економічні і техніко-експлуатаційні характеристики судна, з другого – зменшує вартість і тривалість будівництва.

Для морських круїзних суден, життєвий цикл яких складає понад тридцять років, характерною модернізацією є збільшення довжини судна за рахунок виготовлення додаткової вставки корпусу. Вартість такої модернізації може знаходитись в межах від 10% до 30% від початкової вартості виготовлення судна даного проекту [1–8]. При цьому, їх

пасажиромісткість збільшується на 15%...20%. Подібна процедура, незважаючи на збільшення кількості нових суден і термінів їх окупності, мала давню практику застосування в торговому судноплаванні. В останні роки, вона стала актуальною і для круїзного флоту.

Основні питання, які неминуче виникають зі збільшенням довжини корпусу судна, це питання зміни характеристик його міцності, та маневрених характеристик. Зокрема, резолюцією MSC.137(76) "Стандарти маневрених якостей суден", прийнятої на 76 сесії Комітету з безпеки на морі, передбачається, що маневрені характеристики судна, що проєктується, ще на стадії проєктування повинні задовольняти «Стандартам». Якщо ремонт, переробка або модифікація, на думку Адміністрації, може вплинути на маневрені характеристики судна, слід перевірити їхню відповідність «Стандартам».

Постановка проблеми. Питанням розрахунку маневрених якостей суден присвячено фундаментальні роботи [9] відомих вчених, що досліджують питання управління суден. В основі розрахункових методів оцінки покладено результати розв'язання системи диференціальних рівнянь руху судна та роботи двигунів і гребних гвинтів. Практично ж при цьому, традиційно приймається припущення [10, 11], що двигуни гребних гвинтів працюють у сталому режимі і розв'язуються тільки рівняння руху судна [12].

Однак, проведені раніше дослідження [9–11], показали, що крім геометричних параметрів корпусу судна, на його маневрені якості впливають зміна швидкості руху і зміни частоти обертання гребного гвинта. З виходом судна на криволінійну траєкторію його швидкість падає, зростає момент опору гребних гвинтів, збільшуються навантаження на гребні двигуни, частота їх обертання зменшується, що в свою чергу, веде до ще більшого зниження швидкості руху.

Гребні установки сучасних круїзних суден електричні. Вони входять до складу єдиної суднової електроенергетичної установки, тому зі збільшенням навантаження на гребні електродвигуни зростають навантаження на всю електроенергетичну систему. При складних маневрах ці навантаження можуть перевищувати [15] границі, які встановлені для електроенергетичного обладнання, та викликати спрацювання систем захисту. Зважаючи на це, для коректного аналізу показників якості маневрування електрохода, необхідно розглядати весь судновий пропульсивний комплекс, який включає в себе (як нерозривні [9] складові) і корпус судна, і гребні гвинти, і руль (кермо), і гребну електроенергетичну установку.

Стандарти ІМО виділяють найбільш суттєві показники для оцінки маневрених характеристик судна. При оцінці їх керованості, до цих показників якості відноситься контроль «нишпорення», що характеризує реакцію судна на перекладку руля у протилежний бік, як наприклад це має місце, при виконанні маневру «зигзаг». Розробка методу оцінки впливу конструктивних параметрів (довжини) корпусу електрохода на показники якості виконання маневру «зигзаг» є метою цієї роботи.

Мета та задачі дослідження. Мета досліджень полягає в розробці методу оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електроходів на маневрені показники при проведенні розмірної модернізації пасажирських суден. Для поставленої мети необхідно вирішити низку задач:

1) розробити з позицій системного підходу структурну схему, що віддзеркалює взаємодію елементів суднового пропульсивного комплексу, і метод розрахунку ключових показників, які характеризують його роботу;

2) провести порівняльний аналіз впливу збільшення довжини судна на показники якості виконання маневру «зигзаг» і комплексну оцінку цих показників на відповідність стандартам маневреності, які регламентуються Стандартом маневреності згідно Резолюції MSC.137.(76).

3) дослідити вплив подовження судна на якість його керування і на показники роботи суднової електроенергетичної установки, порівняти ці результати з вимогами Регістру судноплавства.

Виклад основного матеріалу. У загальному випадку структурна схема пропульсивного комплексу електроходу має вигляд [13–14], представлений на рис. 1. Вона включає: D – первинні двигуни; G – електричні генератори; SE – перетворювачі електроенергії; M – гребні електродвигуни (ГЕД); P – гребні гвинти; CS – систему управління; DR – регулятори первинних двигунів; GE та ME – пристрої збудження генераторів та гребних електродвигунів; R – кермо; $HULL$ – корпус електроходу. У систему контролю також входять датчики: потужності P_D та швидкості обертання ω_D первинних двигунів; напруги U_G та струму I_G генераторів; напруги U_M , струму I_M , крутного моменту M_M та швидкості обертання ω_M ГЕД.

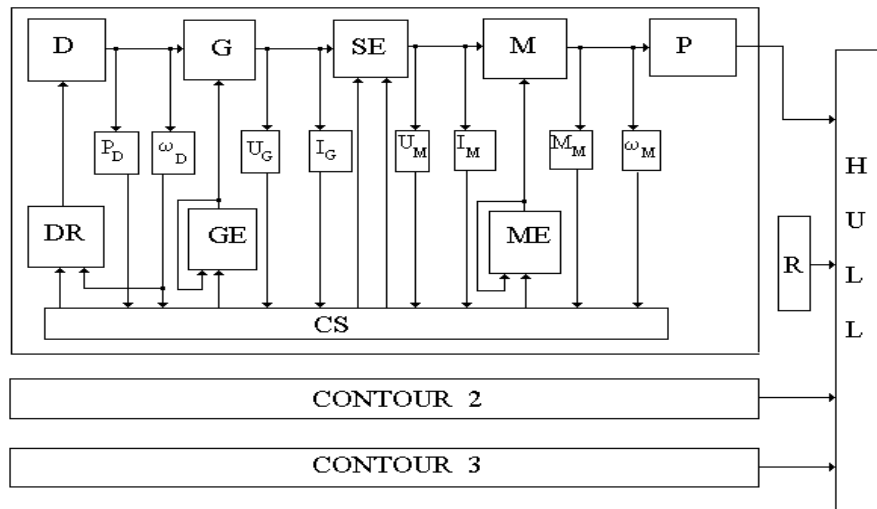


Рисунок 1 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

На основі структурної схеми, для розрахунку поточних (при маневруванні судна) значень режимних показників комплексу розроблено математичну модель перехідних режимів роботи всіх його складових частин [15]. Система рівнянь, яка при цьому була отримана, складна і громіздка. На перехідні режими роботи впливають сотні параметрів. У таких ситуаціях аналізувати вплив конструктивних параметрів на показники якості маневрування майже неможливо. Крім того, результати досліджень, виконаних для будь-якого конкретного судна, відносяться тільки саме для цього судна, що суттєво знижує їхню наукову цінність.

Для скорочення числа параметрів, для надання спільності результатам аналізу, для можливості розповсюдження цих результатів на широкий клас суден доцільно скористатися поняттям динамічно еквівалентного наближеного комплексу [9]. Відповідно до такого підходу, система рівнянь приводиться до безрозмірної форми і в ній виділяються критерії її динамічної подоби – безрозмірні параметри пропульсивного комплексу. За результатами таких перетворень:

- кількість параметрів (тепер вже – критеріїв динамічної подоби системи) скорочується в 5–6 разів;
- з’являються широкі можливості узагальнення результатів досліджень: комплекси з однаковими значеннями параметрів матимуть однаковий характер зміни відповідних режимних показників (у відносних одиницях);
- отримувані результати будуть прийнятні для всіх електроходів класу, що розглядається.

Математична модель та розроблений на її основі метод розрахунку дозволяє відшукувати поточні (у відносному часі) значення (у відносних одиницях) режимних показників на перехідних режимах роботи комплексу. Відносні значення визначаються як відношення поточних значень до базових. Відносний час T визначається як

$$T = \frac{v_0}{L} t, \quad (1)$$

де v_0 – швидкість руху судна в базовому режимі;

L – довжина судна по КВЛ;

t – реальний час.

У процесі моделювання маневрених режимів розраховують значення:

– кутової швидкості обертання ω_D , крутного моменту M_D та потужності P_D первинних двигунів;

– напруги U_G та струму I_G генераторів;

– напруги U_M та I_M струму гребних електродвигунів;

– крутного моменту M_M та кутової швидкості обертання ω_M ГЕД;

– моменту опору M_P та упору P_P гребних гвинтів;

– параметрів руху судна у зв'язаній XYZ (складових швидкості v_X і v_Y вздовж поздовжньої X та поперечної Y осей корпусу судна; кутової швидкості обертання Ω_Z навколо вертикальної осі Z) та у незв'язаній $X_1Y_1Z_1$ (складових швидкості v_{X1} , v_{Y1} , кута швидкості ψ_C курсу та пройденого шляху $X1$, $Y1$) з судном системами координат.

До типових маневрів, що використовуються для оцінки якості управління судном, відноситься так званий зигзаг Кемпфона, якій полягає у періодичній перекладці руля з борту на борт. У стандарти ІМО, у якості стандартних випробування суден, включені два види випробувань на «зигзаг» – $10^\circ/10^\circ$ і $20^\circ/20^\circ$. У першому випадку кермо кладеться на 10° будь-якого борту, а потім, коли напрямок руху зміниться на 10° , перекладається на такий самий кут іншого борту. У другому випадку кут кладки керма та зміна напрямку руху становлять 20° .

Найбільш важливою інформацією, що одержується з випробувань, є:

а) початкова здатність до повороту: із застосуванням кута керма 10° ліворуч/праворуч, судно не повинне пройти більше ніж 2,5 довжини судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу;

б) значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не повинно перевищувати:

– 10 градусів, якщо L/v менше 10 с;

– 20 градусів, якщо L/v становить 30 с, або більше;

– $[5 + 1/2(L/v)]$ градусів, якщо L/v становить 10 с або більше, але менше ніж 30 с, (де L і v виражені в м і м/с відповідно);

в) значення другого кута перевищення в тесті «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не повинно бути більше:

– 25 градусів, якщо L/v менше 10 с;

– 40 градусів, якщо L/v становить 30 с, або більше;

– $[17,5 + 0,75(L/v)]$ градусів, якщо L/v становить 10 с, або більше, але менше ніж 30 с;

г) значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $20^\circ/20^\circ$ не повинно перевищувати 25 градусів.

Імітаційне моделювання процесу виходу електрохода на маневр проводилося мовою JAVA. На рис. 2, який ілюструє схему руху судна при виконанні маневру «розгін – вихід на зигзаг», вказані характерні точки A_i :

A_0 – вихідний стан судна;

A_1 – вихід судна на тестову швидкість $v = 1$; поворот керма у правий борт на тестовий кут β_R ;

A_2 – вихід судна на курс ψ_C (правий борт), що відповідає тестовому куту β_R ; поворот керма на тестовий кут у лівий борт;

A_3 – вихід судна на максимальний кут ψ_C (правий борт) – перший кут перевищення;

A_4 – вихід судна на курс ψ_C (лівий борт), що відповідає тестовому куту β_R ; поворот керма на тестовий кут у правий борт;

A_5 – вихід судна на максимальний кут ψ_C (лівий борт) – другий кут перевищення;

A_6 – вихід судна на курс $\psi_C = 0$; закінчення маневру.

Розгін електроходу здійснювався до значення відносної швидкості руху судна $v = \frac{v_t}{v_0} = 1$, де v_t – поточна швидкість. (Далі, під v розумітиметься саме відносна швидкість).

Після закінчення розгону (точка A_1), починає «зигзаг». Закінчення маневру – у точці A_6 , коли курс судна досягає значення $\psi_C = 0$.

Основними режимними показниками, в процесі розрахунків, обрані перелічені вище:

– параметри руху судна у зв'язаній XYZ та у незв'язаній $X_1Y_1Z_1$ з ним системах координат;

– упор і момент опору гребних гвинтів;

– режимні показники роботи гребних електродвигунів, генераторів та первинних двигунів генераторних агрегатів.

На рис. 3, як приклад, наведено поточні значення режимних показників, які були отримані за результатами моделювання маневру «розгін – вихід на зигзаг» для пасажирського судна – електрохода LIRICA. Розглянуто «зигзаг» $20^\circ/20^\circ$.

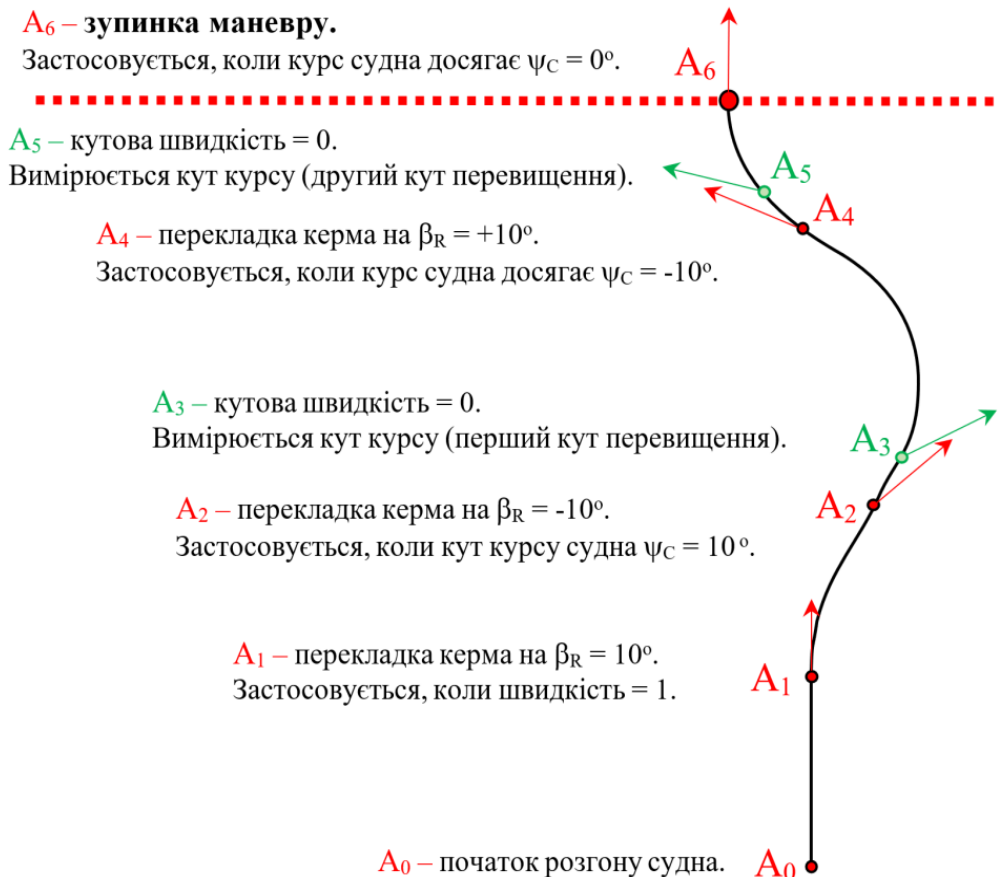


Рисунок 2 – Схема руху судна під час виконання маневру "розгін – вихід на зигзаг"

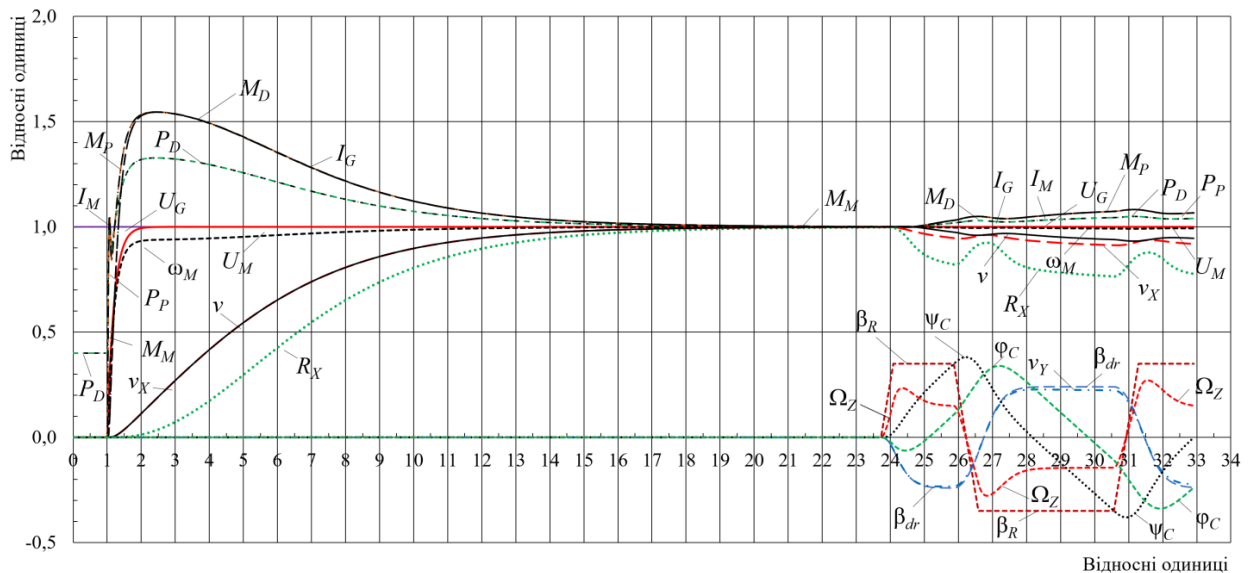


Рисунок 3 – Поточні значення режимних показників при виконанні маневру "розгін – вихід на зигзаг"

Крім перерахованих режимних показників, на рис. 3 показані:

- кут повороту керма β_R ;
- кут дрейфу β_{dr} ;
- складова сили опору води руху судна по поздовжньої осі – R_X .

Аналіз результатів моделювання показує таке. При виході судна на "зигзаг", навантаження на електроенергетичну установку зростають. Причиною цього є коливальні зміни поздовжньої складової R_X сили опору води руху судна і зміни, у зв'язку з цим, швидкості руху v . У результаті – збільшуються навантаження і на гребні електродвигуни, і на генератори, і на теплові двигуни генераторних агрегатів. У той же час, ці додаткові навантаження невеликі і не перевищують допустимих значень.

Траєкторія руху судна на маневрі, що розглядається, показана на рис. 4. Вона відповідає «зигзагу» $10^\circ/10^\circ$.

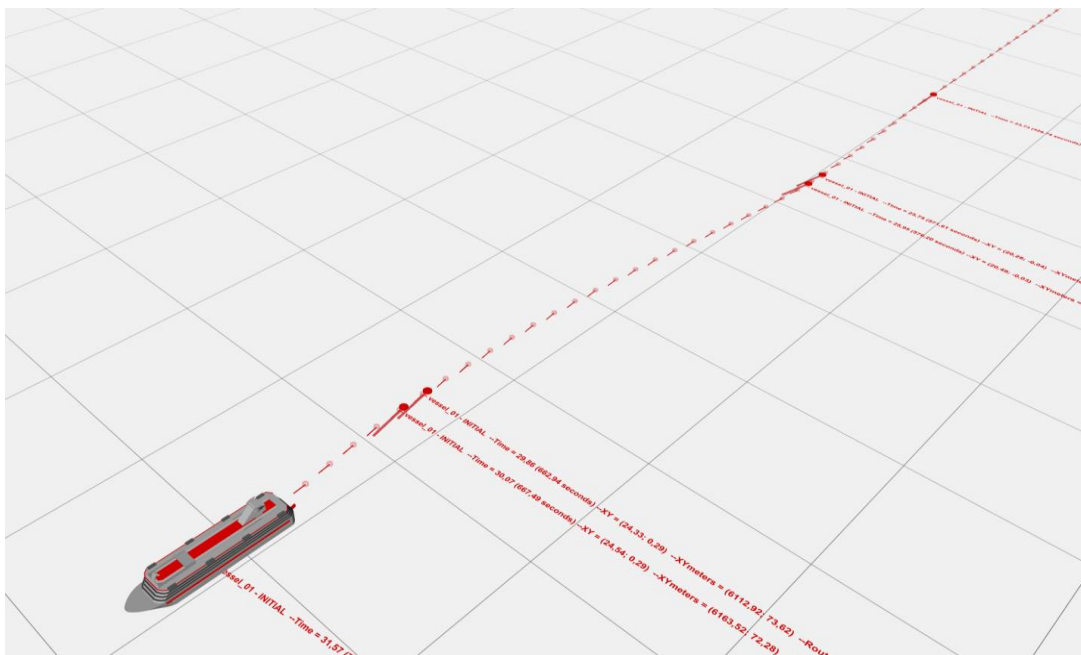


Рисунок 4 – Траєкторія руху судна

Комп'ютерна візуалізація маневру дозволяє проаналізувати траєкторію руху та оцінити всі показники, що характеризують цей маневр. У характерних точках A_i траєкторії, по лівому борту судна (див. рис. 4) проставлені:

- тривалість пройденого етапу у відносному (T) та абсолютному (t) часі;
- пройдений шлях по осях X_1, Y_1 та пройдена судном дистанція S_1 у відносних (в довжинах судна) та абсолютних (у метрах) одиницях;
- швидкість судна v у відносних одиницях;
- кут курсу судна ψ_c .

Розроблений математичний апарат, працездатність якого проілюстрована, дозволяє перейти до вирішення основного завдання – оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електрохода на показники якості виконання маневру «зигзаг».

Поточні значення режимних показників, і відповідно показники якості маневрування, залежать від узагальнених безрозмірних параметрів пропульсивного комплексу електрохода. У більшість цих параметрів входить довжина судна L . З подовженням корпусу судна значення цих параметрів змінюються, отже змінюються і показники якості виконання маневру. Істотний вплив на показники якості маневрування, при русі судна по криволінійній траєкторії, [13] дають безрозмірні параметри (2) – (17)

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}; \quad (2)$$

$$N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2}; \quad (3)$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{H}{L} \right] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (4)$$

$$C_{M16} = \frac{\beta_{M0}}{r_M'^2} \left[(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) \frac{r_{2M}'^2}{\beta_{M0}^2} + 2r_{1M} \alpha_0 \frac{r_{2M}'}{\beta_{M0}} \right]; \quad (5)$$

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; \quad (6)$$

$$C_{\lambda 2} = \frac{m + \lambda_{22}}{m + \lambda_{11}}; \quad (7)$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}; \quad (8)$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (9)$$

$$C_{12} = \frac{0,07 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (10)$$

$$C_{21} = \frac{0,5C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (11)$$

$$C_{22} = \frac{c_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (12)$$

$$C_{23} = \frac{c_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (13)$$

$$C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (14)$$

$$C_{63} = \frac{2m_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (15)$$

$$C_{64} = \frac{2m_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (16)$$

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}, \quad (17)$$

де: P_{ej0} і K_{Pj} – корисний упор кожного гребного гвинта та його частка у сумарному потоці відповідно; H і m – осадка судна та його маса; ρ – питома густина води; λ_{11} та λ_{22} – приєднані маси води вздовж осі X та осі Y ; F_D – приведена площа зануреної частини діаметральної площини судна; J_Z та λ_{66} – момент інерції судна та приєднаний момент інерції води при обертанні навколо осі Z ; μ_{rx} – коефіцієнт опору керма; μ_k – коефіцієнт бічної сили керма; ψ_c – кут курсу; S_c – приведена площа керма; C_Y^β , c_2 , c_3 – коефіцієнти сили корпусу; m_1 , m_3 , m_4 – коефіцієнти позиційного моменту опору; C_{m0}^ω – коефіцієнт демпфуючого моменту опору; β_{M0} – абсолютне ковзання ротора ГЕД; α_0 – відносна частота напруги ГЕД; r_{1M} , r_{2M}' і b_M , c_M , d_M , e_M – параметри та постійні коефіцієнти асинхронного частотно-керованого гребного електродвигуна.

Як приклад, розглянуто згадане вище, круїзне пасажирське судно – електрохід LIRICA (далі – базове судно), основні параметри якого наведені у табл. 1. Альтернативне судно – це електрохід з тією ж електроенергетичною установкою, але з подовженим на 25 м корпусом. Його параметри наведені у тій же таблиці.

Таблиця 1 – Основні параметри електроходів

Параметр	Базове судно	Альтернативне судно	Параметр	Базове судно	Альтернативне судно
1	2	3	4	5	6
Маса, т	29 698	32 757	Сумарний упор гребних гвинтів, кН	1602	1602
Довжина по КВЛ, м	251,2	276,2	Ширина по КВЛ, м	32	32

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Момент інерції гребного гвинта, кг·м ²	7132	7132	Обертальний момент ГЕД, кН·м	146,1	146,1
Осадка середня, м	6,6	6,2	Коефіцієнт засмоктування	0,136	0,137
Швидкість руху, м/с	11,3	11,3	Діаметр гвинта, м	4,95	4,95
Момент інерції судна навколо осі Z, кг·м ²	1,56·10 ¹¹	2,08·10 ¹¹	Частота обертання гребного гвинта, об/хв	120	120
Коефіцієнт повноти мідель шпангоуту	0,98	0,98	Пропульсивна потужність одного ГЕД, кВт	9180	9180
Приведена площа зануреної частини ДП, м ²	1615	1668	Приведений до валу ГЕД момент інерції, кг·м ²	7404	7404
Коефіцієнт приєднаних мас води навколо осі X	0,013	0,01	Коефіцієнт приєднаних мас води вздовж осі Y	0,386	0,365
Коефіцієнт приєднаних мас води навколо осі Z	0,332	0,32	Потужність електроенергетичної установки, кВт	30 600	30 600
Площа керма, м ²	28	28			

Чисельні значення узагальнених безрозмірних параметрів для базового та альтернативного електрохода представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Узагальнені безрозмірні параметри комплексу

Параметр	Чисельні значення		Параметр	Чисельні значення	
	базове судно	альтернативне судно		базове судно	альтернативне судно
C_{12}	4,505	4,654	C_{65}	7,454	7,422
C_{21}	0,418	0,366	C_{RY}	8,15	8,15
C_{22}	47,76	44,54	N_X	0,104	0,1047
C_{23}	5,79	5,98	N_Ω	0,631	0,636
C_{61}	3,73	3,324	$C_{\lambda 2}$	1,168	1,351
C_{63}	4,385	4,813	$C_{\lambda 21}$	0,736	0,703
C_{64}	0,644	0,266	N_M	5,1	5,1
			C_{M16}	7,15	7,15

Відповідно до Стандартів маневреності (Резолюція MSC.137(76)), для електроходів, параметри яких приведені у табл. 1, критерії оцінки маневру «зигзаг»:

– із застосуванням кута керма 10° ліворуч/праворуч, судно не повинно пройти більше ніж 2,5 довжини судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу;

– значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» 10°/10° не повинно перевищувати $[5 + 1/2(L/v)]$ градусів; для базового електрохода, при $L = 251,2$ м і $v = 11,3$ м/с, це становить 16,1 градусів; для альтернативного електрохода, при $L = 276,2$ м і $v = 11,3$ м/с, значення першого кута перевищення не повинно перевищувати 17,2 градусів;

– значення другого кута перевищення у тесті «зигзаг» 10°/10° не повинно бути більшим $[17,5 + 0,75(L/v)]$ градусів; для базового електрохода це становить 34,15 градусів; для альтернативного – 35,8 градусів;

– значення другого кута перевищення в випробуванні «зигзагом» 20°/20° не повинно перевищувати 25°.

Вплив довжини корпусу електрохода на маневр «зигзаг» оцінено за результатами моделювання обох маневрів – «зигзаг» 10°/10° та «зигзаг» 20°/20°. Маневри виконані за

схемою, наведеною на рис. 2. На рис. 5 представлені траєкторії руху базового та альтернативного електроходу по варіанту $20^\circ/20^\circ$. У початковий момент часу A_0 судна розташовані в початку системи координат, але зі зміщенням (для зручності подання та аналізу результатів) по поперечній осі Y . У момент часу $T=0$ починається розгін. При досягненні швидкості $v=1$ починається маневр «зигзаг», відповідно до стандартної процедури. Маневр закінчується, коли судна виходять на курс $\psi_C = 0$. У характерних точках траєкторій базового та альтернативного судна, за аналогією з рис. 4, представлена інформація про тривалість етапу, пройденого шляху, швидкості та курсу судна.

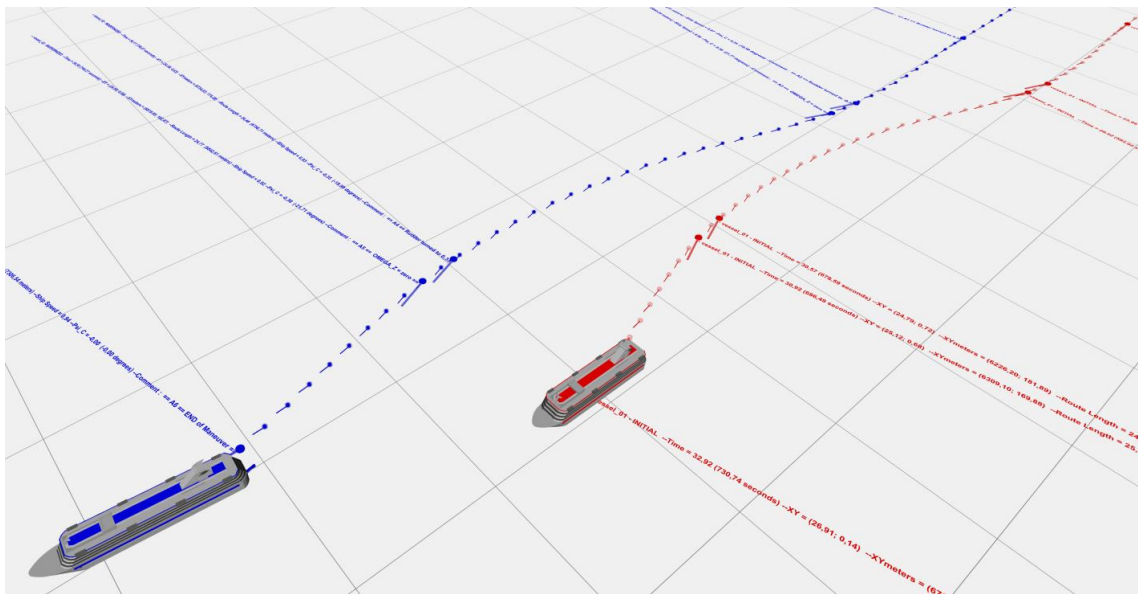


Рисунок 5 – Траєкторії руху базового та альтернативного електроходів

Результати порівняльного аналізу основних показників маневру у базового та альтернативного електроходів наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати порівняльного розрахунку маневру «зигзаг»

Електроход	Показники маневру «зигзаг»			
	Шлях судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу	Перший кут перевищення у випробуванні зигзагом $10^\circ/10^\circ$	Другий кут перевищення у випробуванні зигзагом $10^\circ/10^\circ$	Перший кут перевищення у випробуванні зигзагом $20^\circ/20^\circ$
Стандарт ІМО	$< 2,5 L$	$< 16,1^\circ$	$< 34,15^\circ$	$< 25^\circ$
Базовий	2,01	10,53	10,51	20
Альтернативний	1,84	10,59	10,52	19,99
Відхилення показника, %	- 8,5 %	+ 0,5 %	+ 0,1 %	- 0,05 %

Порівняння результатів розрахунків показує таке. Зі збільшенням довжини судна, більшість показників якості управління, що оцінюються за маневром «зигзаг», практично не змінюються і залишаються у встановлених Стандартом межах. Більше того – шлях, яким проходить судно до моменту зміни курсу на 10° (початкова здатність до повороту), зменшується на 8,5 %, що свідчить про покращення цього критерію.

І у базового, і альтернативного електроходів, із виходом на «зигзаг», у зв'язку зі зміною R_x , змінюється швидкість руху судна. Ці зміни мають нерегулярний характер. У результаті – зростання навантажень на всі складові судової електроенергетичної установки. Але, ці додаткові навантаження невеликі і не перевищують допустимих значень.

Висновки

1. На певному етапі життєвого циклу пасажирських суден встає питання збереження економічної ефективності їх експлуатації. Один із варіантів розв'язування цього питання – модернізація суден зі збільшенням їхньої довжини. Ухвалення рішення про доцільність такої модернізації можливе за умовами непогіршення керованості суден.

2. Запропоновано метод оцінки показників якості маневрування суден з гребними електроенергетичними установками. Оцінку слід проводити з урахуванням перехідних режимів роботи у всіх складових частинах єдиного суднового пропульсивного комплексу. Надано структурну схему комплексу та запропоновано метод розрахунку цих показників.

3. На прикладі конкретного електрохода та його альтернативного (з подовженим корпусом) варіанта проведено порівняльний аналіз впливу довжини корпусу на показники якості виконання електроходами маневру «зигзаг». Оцінку здійснено за показниками, що відповідають Стандартам маневреності Резолюції MSC.137(76).

4. Показано, що при збільшенні довжини судна в межах 10% основні показники виконання маневру практично не змінюються. Якість керування судном не погіршується. На показники якості роботи суднової електроенергетичної установки зміна довжини впливає, проте ці зміни не перевищують меж, регламентованих Регістром. При оцінці доцільність подовження корпусу судна у зазначених межах, слід керуватись саме економічними цілями подібної модернізації.

Перспективою подальших досліджень є розроблення методів оцінки інерційних характеристик та аналізу маневрених режимів суднових пропульсивних комплексів на основі теорії динамічної подібності при проведенні розмірної модернізації суден, як вагомого фактору, що забезпечує їх безаварійну експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cruise Market Watch : веб-сайт. URL: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins> (Last accessed: 15.06.2023).
2. Cruise Lines International Association (CLIA). URL: <https://www.cruising.org.au> (Last accessed: 16.06.2023).
3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). Access mode. Electronic resource : www.dnv.com. Alexandros Chiotopoulos, Gerd-Michael Wuersig, Atle Ellefsen. Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. LNG as ship fuel the future. Today No 01. 2014.
4. Шумило О. М. Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 4 (15), С. 58–77.
5. Saunders, Aaron. *Giants of the Sea : The Ships that Transformed Modern Cruising*. Seaforth Publishing, 2013.
6. Rudenko Sergey, Shakhov Anatoliy, Lapkina Inna, Shumylo Oleksandr, Malaksiano Mykola, Horchynskiy Ihor. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211999743>.
7. Dmytro S Minchev, Oleksiy A Gogorenko, Roman A Varbanets, Yuri L Moshentsev, Vaclav Pi'ste`k, Pavel Kuc`era, Oleksandr M Shumylo and Vladyslav I Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Journal of Automobile Engineering* 1–13 IMechE 2022 Article reuse guidelines : sagepub.com/journals-permissions <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
8. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. Roman Varbanets, Oleksandr Shumylo, Marchenko Andrey Petrovich, Dmytro Minchev, Vladyslav Kyrnats, Vitalii Zalozh, Nadiia Aleksandrovska, Roman Olehovych Brusnyk, Kateryna Volovyk. *POLISH MARITIME RESEARCH* 4 (116). 2022. Vol. 29, P. 88–96 [10.2478/pomr-2022-0046](https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046). DOI: [10.1177/09544070221075419](https://doi.org/10.1177/09544070221075419) sagepub.com/home/pid <https://sciendo.com/article/10.2478/pomr-2022-0046>.

9. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном : Монография. Ленинград : Судостроение, 1983. 272 с.
10. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. *Ocean Engineering*, 2020. vol. 209 (92):107463. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.
11. Kupraty O. Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118. June 2021. P. 7–23. DOI: 10.26408/118.01.
12. Golikov V. A., Golikov V. V., Volyanskaya Y., Mazur O., Onishchenko O. A simple technique for identifying vessel model parameters. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 172 (1), DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/172/1/012010>.
13. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов: Монография. Одесса: Маяк, 1999. 188 с.
14. Яровенко В. А., Черников П. С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. Вип. 6, С. 32–41. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
15. Яровенко В. А., Черников П. С., Зарицкая Е. И., Шумило А. Н. Управление гребными электродвигателями электроходов при движении по криволинейной траектории. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. Вип. 5, С. 58–65. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.5.09.

REFERENCES

1. Cruise Market Watch: веб-сайт. URL: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins>.
2. Cruise Lines International Association (CLIA). URL: <https://www.cruising.org.au>.
3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). (2014). Access mode. Electronic resource: www.dnv.com. Alexandros Chiotopoulos, Gerd-Michael Wuersig, Atle Ellefsen. Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. LNG as ship fuel the future. Today No 01.
4. Shumylo, O. (2023). Optymizatsiya rozmirnoyi modernizatsiyi pasazhyrs'kykh suden z urakhuvannyam enerhoefektyvnosti. *Rozvytok transportu*.
5. Saunders, Aaron. (2013). *Giants of the Sea : The Ships that Transformed Modern Cruising*. Seaforth Publishing.
6. Rudenko Sergey, Shakhov Anatoliy, Lapkina Inna, Shumylo Oleksandr, Malaksiano Mykola, Horchynskiy Ihor. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211999743>.
7. Dmytro S Minchev, Oleksiy A Gogorenko, Roman A Varbanets, Yuriy L Moshentsev, Vaclav Pí'steřk, Pavel Kucěra, Oleksandr M Shumylo and Vladyslav I Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Journal of Automobile Engineering* 1–13 IMechE 2022 Article reuse guidelines : sagepub.com/journals-permissions <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
8. Varbanets Roman, Shumylo Oleksandr, Marchenko Andrey Petrovich, Minchev Dmytro, Kyrnats Vladyslav, Zalozh Vitalii, Aleksandrovska Nadiia, Brusnyk Roman Olehovych, Volovyk Kateryna. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *POLISH MARITIME RESEARCH* 4 (116) Vol. 29, P. 88–96 10.2478/pomr-2022-0046. DOI: 10.1177/09544070221075419 journals.sagepub.com/home/pid <https://sciendo.com/article/10.2478/pomr-2022-0046>.
9. Pershyts, R. (1983). *Upravlyaemost' y upravlenye sudom*: Monohrafiya. Lenynhrad: Sudostroenye.
10. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. (2020). Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. *Ocean Engineering*, vol. 209 (92): 107463. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.

11. Kupraty, O. (2021). Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, June. P. 7–23. DOI: 10.26408/118.01.
12. Golikov, V. A., Golikov, V. V., Volyanskaya, Y., Mazur, O., Onishchenko, O. (2018). A simple technique for identifying vessel model parameters. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 172 (1), DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/172/1/012010>.
13. Yarovenko, V. A. (1999). *Rozrakhunok i optymizatsiya perekhodnykh rezhymiv propul'syvnnykh kompleksiv elektrokhodiv* : Monohrafiya. Odesa.
14. Yarovenko, V. A., Chernykov, P. C. (2017). Metod rozrakhunku perekhodnykh rezhymiv hrebnykh elektroenerhetychnykh ustanovok elektrokhodiv. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 32–41. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
15. Yarovenko, V. A., Chernykov, P. C., Zarytskaya, E. I., Shumylo, A. N. (2020). Upravlinnya hrebnymy elektrodvyhunamy elektrokhodiv pry rusi po kryvolyneynoy traektoriyi. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 58–65. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.5.09.

Shumylo O. M. INFLUENCE OF THE ELECTRIC SHIPS' DESIGN PARAMETERS ON THE PERFORMANCE OF THE «ZIGZAG» MANEUVER

The purpose of the research is to develop a method for assessing the influence of the design parameters of electric ships' hull on maneuverability. Methodology. When maneuvering, all components of the propulsion systems operate in transient modes, significantly influencing one another. A comprehensive approach to the construction of a method for estimating maneuvering indices is substantiated. The analysis is based on a mathematical model of transient modes of ship propulsion systems. The main provisions of dynamic similarity theory are used. Results. Criteria of dynamic similarity are found, which significantly affect the maneuver capability indices. A method for assessing the quality indices of the «zigzag» maneuver performance has been developed. A comparative analysis of the effect of the electric ship hull elongation on the main maneuvering quality indices has been carried out. It is shown that with an increase in the length of the vessel up to 10%, the main indices in accordance with the Maneuverability Standards do not deteriorate. The performance of the electric power plant does not exceed the permissible limits. For the purpose of economic feasibility, elongation of the ship's hull within the specified limits is permissible. Scientific novelty. The main provisions used in the construction of the method for assessing the quality indices of the «zigzag» maneuver performance ensure its versatility. The transition to generalized dimensionless parameters makes it possible to cover a large class of vessels by research. Practical significance. The developed method of calculation enables us to evaluate the degree of deviation of electric ships' maneuvering indices when additional inserts are introduced into the ship's hull. It becomes possible to predict the maneuvering properties of modernized ships. Bibl. 15 tab. 3, fig. 5.

Key words: electric ship propulsion system; modeling of transient modes; «zigzag» maneuver; maneuvering quality indices; influence of hull length.

© Шумило О. М.

Статтю прийнято
до редакції 13.09.2023

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ
ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

DEVELOPMENT AND 3D PRINTING OF VESSEL MODELS WITH AUTOMATED TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

Nosov Pavlo, Ph.D., Associate Professor, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766;

Zinchenko Serhii, Dr.s, Associate Professor, Ship Handling Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Nahrybelnyi Yaroslav, Dr.s, Professor, Dean of Navigation Faculty Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: navidepkmsma2020@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3266-5798;

Onyshko Dmytro, Senior Lecturer, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: onushkodn@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8394-3091;

Polishchuk Vadym, Deputy dean of Navigation Faculty, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: vadpoli6@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4970-8010.

The aims to enhance maritime navigation quality and safety by developing autonomous navigation systems that mitigate the negative impact of human factors through advanced software and hardware integration with servers and onboard controllers.

A pivotal challenge faced by researchers is to minimize the potentially negative implications of human factors in the context of vessel management, and to develop efficient mechanisms for software and hardware interaction with servers and onboard controllers.

From a methodological perspective, the research encompasses: a) the development of modules to refine management processes; b) the creation of simulation stands for comprehensive research; and c) the design of a detailed 3D model of the MSC Panaya container ship.

The principal outcomes of our study involve the creation of a detailed 3D model of the MSC Panaya container ship, based on factory blueprints. Utilizing advanced 3D printing technology and PLA plastic, physical models ready for field testing of the proposed technical solutions were successfully fabricated. After selecting and configuring a remote-control system for the ship model, it was ensured to be waterproof, maneuverable, and compatible with other components. Using the chosen remote-control system, the model could operate at a distance of up to 500 meters. Notably, the application of PID controllers assists in stabilizing the vessel under varying weather conditions and marine currents. Furthermore, approaches to optimize hardware components, including microcontrollers, sensors, and associated software, were explored. Emphasizing the development of autopilot systems for ship models up to 2 meters in size, it was discerned that compact sensors such as LIDAR, cameras, and sonars could be particularly beneficial for such vessel models. Additionally, communication systems and integrated GPS modules can simplify navigation and interaction.

The practical contribution of the study is reflected in the development and implementation of comprehensive technical solutions aimed at the optimal interaction of the ship model with water bodies, considering the dynamics of weather conditions and nuances of maritime navigation. Experimental testing under real conditions and modern control systems have augmented the efficiency of the model's operation. Prospects for further research include additional refinement of technical solutions and their adaptation to the needs of real ship systems.

Key words: Autonomous navigation systems; human factor; ECDIS/AIS; 3D modeling; remote-control system; PID controllers; maritime navigation.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.070–081

Introduction. The current state of navigation systems development, automated and intelligent means of controlling the movement of vessels, complex multi-parameter automatic modules requires continuous improvement of relevant information and formal models and methods to maintain the reliability and safety of navigation. The directions of development of this field determine the synthesis of new approaches, development of software and hardware for simulation and field experiments, aimed at identifying priorities in the science and technology of water transport.

The human factor is currently the weakest link in the vessel control system [1–3]. According to world statistics, it is the human factor that causes accidents and catastrophes at sea in 75–96% of cases. Modern approaches and organizational measures taken to strengthen the training and

retraining of seafarers, amendments to the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, and other IMO measures have not led to a significant reduction in accidents.

This is due to growing number of information sources that the captain (pilot) must process at the same time. It is the information and organizational load, the high level of responsibility is the reason for the increase in vessel accidents. Thus, today it is becoming increasingly clear that the most effective way to achieve the desired result is to reduce the impact of the human factor through introduction of modern information control systems for vessel traffic.

The study [4] points out that in practice there are many difficult situations when the International Regulations for Preventing Collisions of Ships of 1972 (COLREG-72) do not have clear answers and recommendations for the actions of another vessel in divergence and maneuvering. Usually, in such situations, the navigator makes decisions from his own experience, which significantly increases the level of danger in maritime transport. Ambiguity in situations where, for example, a vessel loses control, stops, or violates rules requires scientists to conduct multiple simulations and field research, mathematical and software processing of large data sets, which will further develop appropriate automated modules to support decision-making in complex and atypical situations.

The research presented in [5] is aimed at analyzing the probability of stability of vessel traffic, approaches based on the entropy of information about navigation states. Experts are directly involved in such situations, transforming their experience into a decision support information system. This area of research is also related to risk analysis, loss of balance of control actions, analysis of the degree of uncertainty of the navigation situation and thus supports the research areas of the research laboratory on an integrated approach to collecting experimental data. The difficulty of solving this problem remains quite high because expert opinion is not subject to the negative influence of human factors and this fact suggests that the scientific search to avoid it in difficult situations should continue.

In certain areas of prevention of negative manifestations of the human factor involved organizational approaches aimed at the cognitive mechanisms of the operator-navigator [6]. Interviews of seafarers in difficult situations are conducted, structural conclusions are drawn and guidelines are formed. However, even these measures do not give significant results, because the pilots during the interview and those who are directly on board are in different physiological states. In connection with these circumstances, the processes of situation analysis and decision-making are formed differently with different priorities and time for information processing. All this presupposes taking into account the conditions in which the decision-makers make decisions, the formation of individual models of decision-making, and so on. Thus, the time ranges of decision-making and the time of the maneuvering stages depend on the perception of the situation by the navigator [7]. This area of research is important because of the distortion of the processes observed during time maneuvering by the navigator. It is the perception of risk that affects the time distortion of the navigator and causes uncertainty in his actions, which introduces an imbalance in navigation safety.

Also, taking into account the significant economic losses caused by disruption of main waterways and canals, special attention should be paid not only to emergencies, but also to emergencies that have insignificant differences in maneuvers and difficult harbour crossings [8, 9]. In this case, the courses do not intersect and the rules of COLREG-72 are not violated. However, atypical actions and minor deviations from the vessel's established trajectories, speed, time maneuvering stages and limited sources of information for the captain's decision-making should be of concern for control and information support. In such circumstances, there is a high level of uncertainty in the set of indicators and parameters of the vessel, which signals the non-typical situation. In order to constantly monitor navigation situations, there is a need to create automated and intelligent control systems that will track even minor differences from the trajectories in predetermined locations.

Statistical surveys usually introduce a multi-navigation risk assessment system [10], which

uses vessel risk profile inspection data, automatic identification system (AIS) data and expert judgment. The combination of data gives a complete situation that allows port operators to understand the situation in the maximum possible detail. However, the dynamic nature of maneuvering vessels and the difficulty of forecasting them in bad weather or abnormal situations should be taken into account. The combination of approaches significantly expands the analytical capabilities of the system, but requires the creation of new and mathematical models and methods of vessel traffic control and appropriate automated control systems. The creation of such systems will provide comprehensive support for individual vessels and the management of the local system of vessel traffic in the water area and increase the safety of navigation.

The research aims to enhance maritime navigation quality and safety by developing autonomous navigation systems that mitigate the negative impact of human factors through advanced software and hardware integration with servers and onboard controllers.

Main research material. To obtain new scientific solutions, build innovative integrated systems of human-machine interaction in the ergatic systems of maritime and inland water transport of Ukraine in the KSMA was established research laboratory "Development of decision support systems, ergatic and automated control systems for vessel."

The main task of the research laboratory is to conduct a set of scientific research related to the creation of latest automated control systems for vessel traffic and minimize the impact of human factors on these processes.

In the framework of the agreement with the Ministry of Education and Science of Ukraine for 2021 provides for the development of material and technical base of research laboratory and conducting on its basis a number of studies related to improving models and methods of vessel traffic control in divergence and maneuvering to mitigate negative consequences of human factors on vessel control processes.

The development of the material base of the research laboratory, its facilities with equipment for simulation and field simulation, provided a solution to a number of problems aimed at developing a simulation stand using information signals navigation Navi Trainer 5000. This allowed mathematical and software processing of signals from navigation sensors for the system of automated control of movement of vessels in difficult navigational conditions.

An important component of the successful application of new approaches and scientific ideas was the development of appropriate mathematical software for modules of automated control of vessel traffic with their subsequent use in identifying the risk of vessels collisions. This approach allowed the use of optimal programs of divergence and complex maneuvering, avoiding the manifestation of the human factor of captains [11, 12], but performing, at the same time, control functions under the general control of the navigator. In this case, the captain receives effective means of optimal control of the vessel's movement and has the opportunity in real time to choose the time of application of the appropriate automated modules at its discretion according to their qualifications.

All this allowed to develop a multi-module DSS, which comprehensively performs the task of identifying the navigation situation, calculated analysis of collision risks, by analyzing the positions of vessels and vectors of their relative motion, as well as models of human-machine interaction.

To obtain the results of scientific research carried out in the laboratory, the research was conducted in the following areas:

- research and development of decision support systems;
- research and development of automated vessel traffic control systems;
- research and development of ergatic systems in vessel control;
- use of navigation simulators, simulation stand modelling for research and development of these systems;
- study of the negative impact of human factors on the safety of traffic control.

The designated research directions of the laboratory are focused on comprehensive maintenance of navigation safety through the use of automation and the latest information

technologies. This includes the development of decision support systems, automated vessel traffic control systems, ergatic systems in vessel management, the use of navigation simulators for research and development of these systems, and the study of the impact of human factors on traffic control safety.

The primary research focus of the laboratory is the development of automated systems and field models of vessels, which provide scientific data and results to enable maneuvers without human intervention, enhancing the accuracy and reliability of operations. These developed systems are also aimed at optimizing vessel traffic control and reducing the negative impact of human factors on this process. [13].

The research laboratory's work was focused on combining three key aspects: identifying the negative manifestation of the human factor and implementing the functions of the navigator's decision support system. Additionally, the laboratory emphasized the transition to automatic control of vessel traffic to prevent accidents and emergencies in maritime transport.

The automated systems being developed involve the use of an on-board computer with modular software focused on performance of individual functional tasks, the number of which can be scaled as required, as determined by modern control vessels practices. In this direction, work is already underway to create mathematical, algorithmic and software automatic separation module for many purposes, including maneuvering, module to increase the reliability of the vessel's traffic control system, module for optimal maneuvering in narrows and channels using the vessel's center of rotation and Pivot Point, management of redundant structures of executive devices.

An important area of the research work laboratory is software and hardware interaction with ECDIS and AIS servers, which will provide the full range of navigation data for multi-stage disaster forecasting, taking into account weather conditions.

The creation of a simulation stand as a research task, as well as further development of programs for the on-board controller of full-scale vessel models provides continuous monitoring of command devices and actuators by comparing the measured parameters of the vessel with their estimates in the virtual environment of Navi Trainer 5000 and during field experiments on water.

In the future, in addition to vessels with traditional control, research will be conducted to develop a module for optimal control of redundant structures of actuators used on military vessels, passenger vessel, special purpose vessels, platform support vessels and the platforms themselves. Redundant structures can be used to optimize control processes according to the selected target function. This makes it possible to improve traditional manual redundancy and increase the reliability of actuators and the maneuverability of vessel. However, redundant structures are also expected to be used for optimized control processes.

The focal point of the research laboratory's work is the development and application of a simulation stand based on the navigation simulators of the Kherson State Maritime Academy. This stand is created by integrating system units with information exchange software and the software of functional modules of the traffic control system into the local area network of navigation simulators. The developed simulation stand is aimed at developing and testing mathematical software for vessel traffic control systems using all the capabilities of training equipment (models of different vessels, targets, navigation equipment, sailing areas, weather conditions and equipment failures). Multi-parameter analysis of navigation data in real time with a discrete step in a split second allows you to form management decisions without delay.

The accumulated base of field experiments over several years of operations and maneuvers by navigators on navigation simulators allows to ensure high accuracy of data processing by nonlinear multiparameter mathematical and software tools, which increases the accuracy of decision support systems, their proximity to real conditions and reliability.

The relevance and choice of the proposed scientific approaches is supported by a number of modern studies of both domestic and foreign scientists. The difficulty of these studies is that the vessel has its inertia, according to its mass and length, and therefore the time to the nearest approach point (TCPA) is changing dynamically and navigation simulators are not able to fully convey all the physics and realism of processes. This makes it necessary to use models of vessel to

be made using 3D printers, as provided in the research laboratory.

The plan to create a detailed and functional 3D model of a ship using SolidWorks:

1. Analysis of Theoretical Drawings

Tools: Use 'Sketch' for initial outlines based on drawings.

Commands: 'Import' for bringing in the factory drawings.

Functions: 'Measure' and 'Dimension' tools for accuracy.

2. Formation of 2D Contours

Tools: '2D Sketch' for creating the initial hull contours.

Commands: 'Convert Entities' to transfer 2D sketches into workable profiles.

Functions: 'Offset' and 'Trim' for adjusting and refining contours.

3. Creation of a 3D Base Surface

Tools: 'Surfaces' for generating the hull's 3D base.

Commands: 'Lofted Surface' for complex shapes.

Functions: 'Reference Points' for accurate spatial form creation.

4. Designing the Complex Surface of the Hull Bow

Tools: '3D Sketch' and 'Surface Tools' for the hull bow.

Commands: 'Swept Surface' for complex curved surfaces.

Functions: 'Cutting Planes' for detailed shaping.

5. Hull Modelling and Shaping Operations

Tools: 'Extrude', 'Revolve', and 'Sweep' for main hull shaping.

Commands: 'Shell' for hollowing out sections.

Functions: 'Fillet' and 'Chamfer' for smooth edges and transitions.

6. Formation of the Longitudinal Contour

Tools: 'Solid Bodies' for creating the main structure.

Commands: 'Boolean Operations' for subtracting and adding geometries.

Functions: 'Combine' for merging different parts.

7. 3D Modelling of Deck Superstructures

Tools: 'Assembly' for putting together different segments.

Commands: 'Mates' for aligning and positioning components.

Functions: 'Pattern' for replicating similar structures.

8. Combining Elements into a 3D Assembly Model

Tools: 'Assembly Modeling' for combining all ship components.

Commands: 'Insert Component' for adding individual parts.

Functions: 'Interference Check' for ensuring no parts clash.

9. Direct Production and Control

Tools: '3D Printing Prep' for preparing the model for printing.

Commands: 'Export to STL' for 3D printing compatibility.

Functions: 'Simulation' for testing the model's performance.

Creating a model MSC container vessel for field modelling. As part of the research laboratory "Development of decision support systems, ergatic and automated vessel traffic control systems" in 2021 was developed the 3D parametric model of the container vessel MSC Panaya Drawings according to accurate factory drawings (Fig. 1).

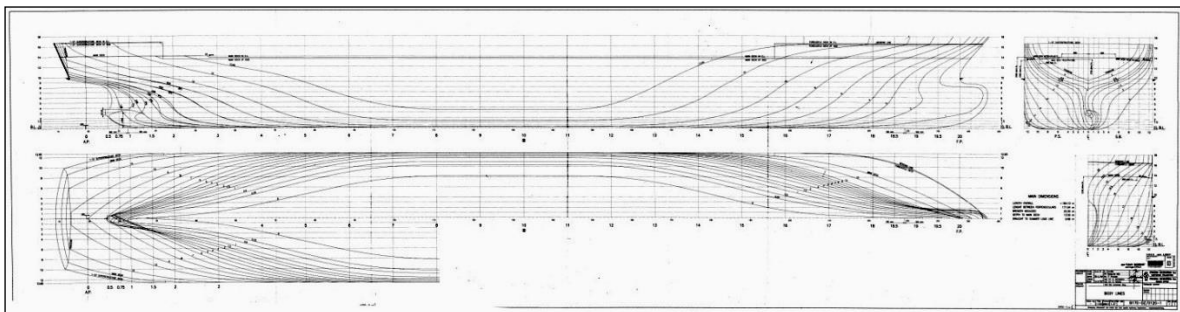


Figure 1 – Theoretical drawing of the vessel

Theoretical drawings of the vessel were analyzed and 2D contours of its hull with step-by-step transfer of mid-frames to 3D shape were formed (Fig. 2).

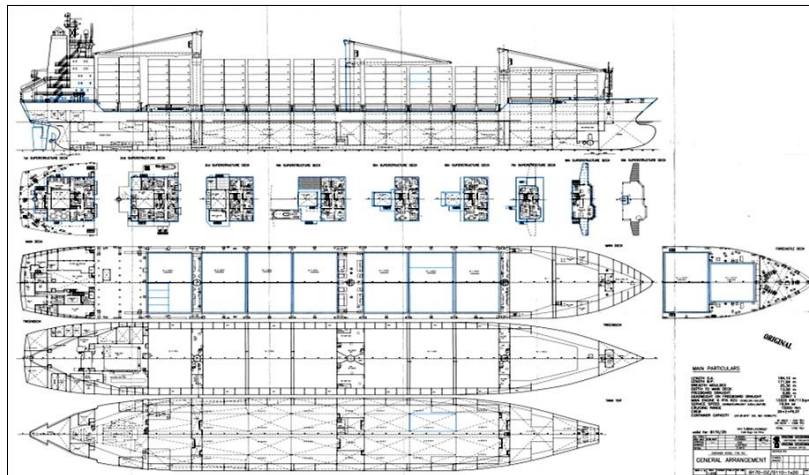


Figure 2 – Formation of the main geometric bases for 3D modelling

Having received the main contours of the vessel, it became possible to form a three-dimensional base surface of the hull. The geometry of the main forming surfaces and the number of reference points for the formation of spatial forms were taken into account (Fig. 3).

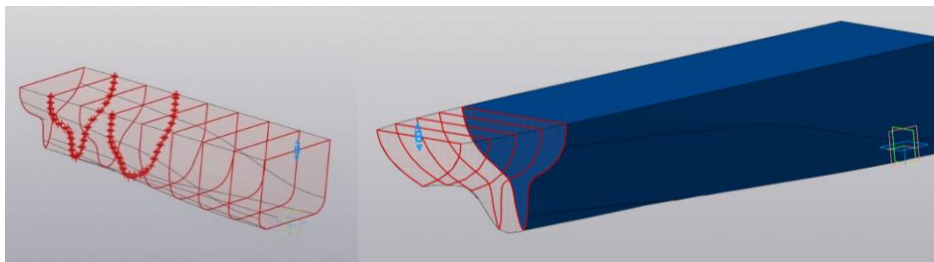


Figure 3 – Formation of the hull model in space

The complex surface of hull bow with the pitch and cutting planes is designed, which allows to most clearly define the complex spatial surface (Fig. 4).

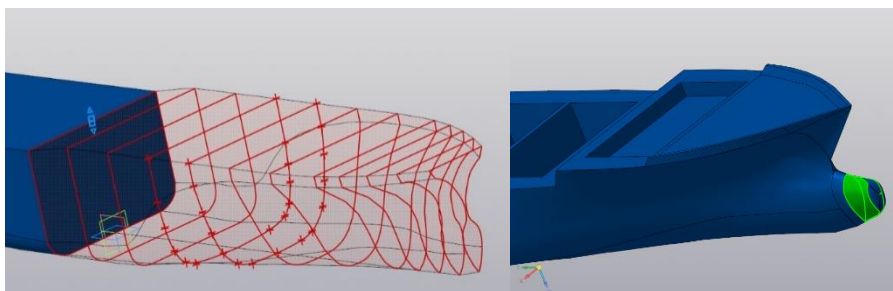


Figure 4 – Formation of the vessel bow

Hull modelling also involved a number of shaping operations (Fig. 5). As a result, the basis for the location of rudder pen and the inner propeller shaft was made.

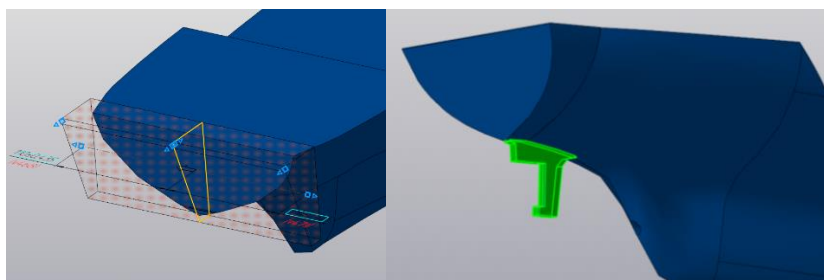


Figure 5 – Formation of the stern of the vessel

The next stage was the formation of the longitudinal contour of vessel as a solid object. Boolean subtractions were made from the surface of hull to build holds.

The next step was to perform 3D models of deck superstructures. The formed vessel segments have structural holes for stacking them and reproduce complex geometric shapes with high accuracy (Fig. 6).

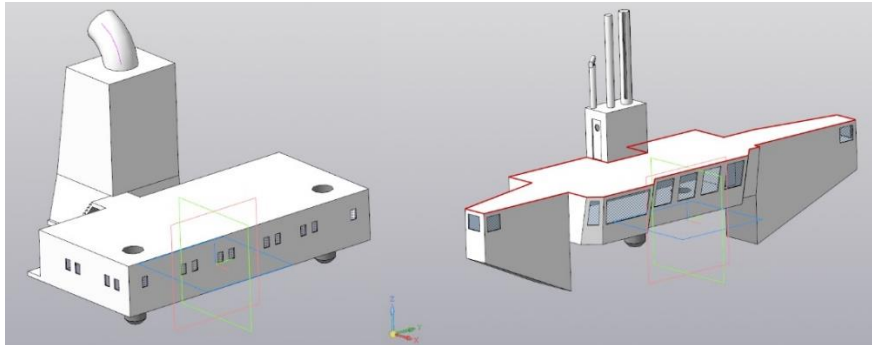


Figure 6 – Stages of deck superstructures formation

Subsequent segmental creation of the superstructure and other elements of the vessel allowed them to be combined into a 3D assembly model of the vessel (Fig. 7).

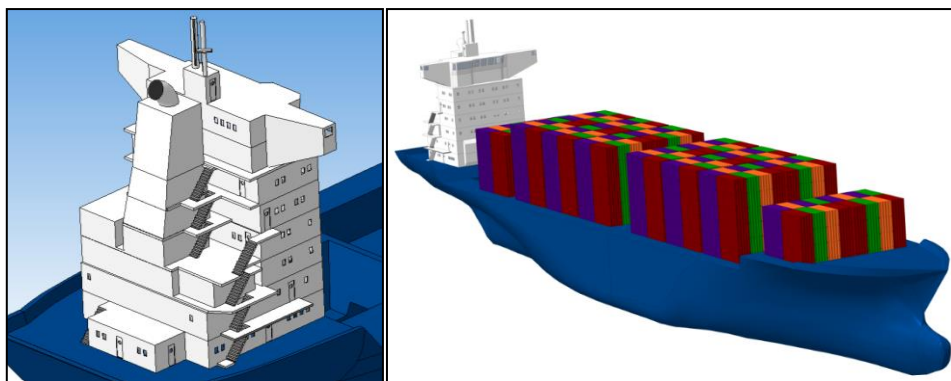


Figure 7 – Creating a 3D assembly model of the MSC Panaya Drawings

Built 3D parametric models allow you to go directly to the production of original model vessel using the latest information technology to control its movement.

Printing 3-D model of the MSC vessel. The designed 3D models of vessels were exported to Ultimaker Cura and the printing parameters and corresponding settings were determined (Fig. 9).

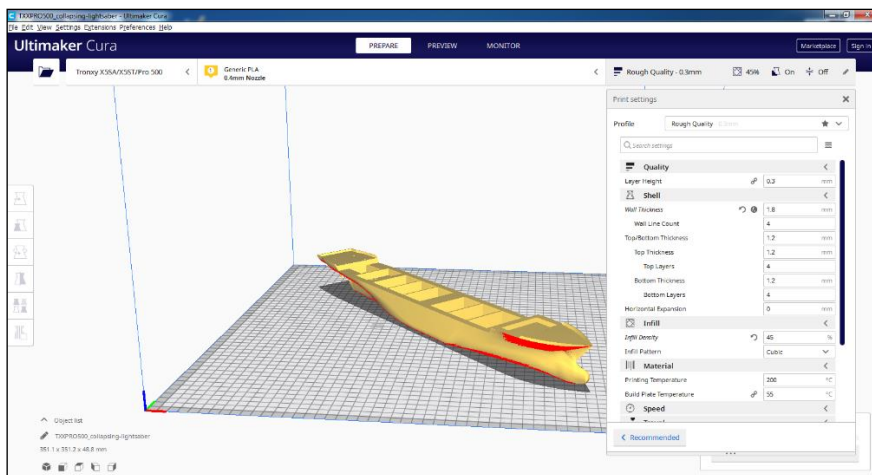


Figure 9 – Configuring print settings in Ultimaker Cura

The obtained indicators of vessel model made by 3D printing allowed to obtain control software trajectories (Fig. 10).

In order to print certain parts of spatial physical model of the vessel, a 3D printer was purchased – Tronxy 500 pro (Fig. 11). The main feature of this printer is that it allows you to print components of vessel models of a sufficiently large size. This 3D printer was purchased for the needs of laboratory.

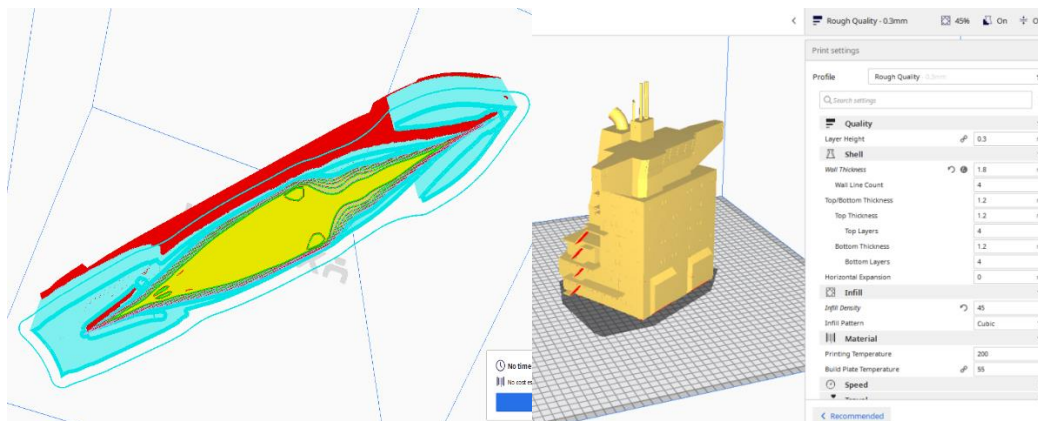


Figure 10 – Formation of the executive path for 3D printing (G-code)

The dimensions of printed components of the vessel allow for electronic means to control and determine its own position relative to other target-vessels.

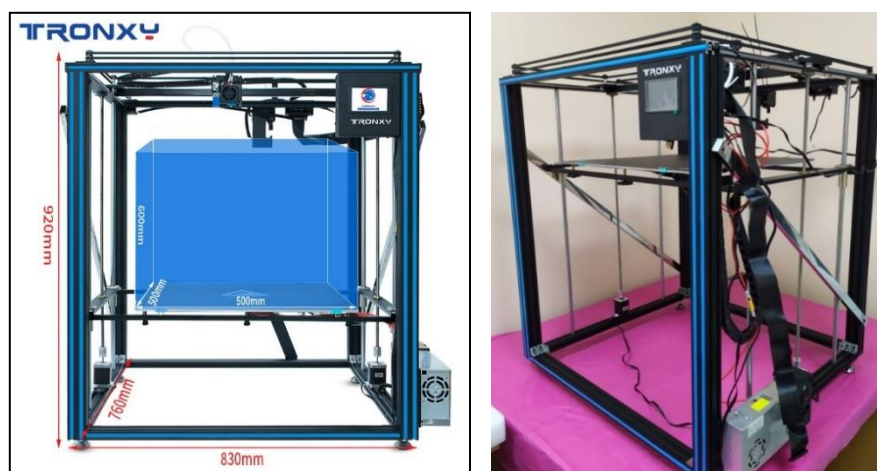


Figure 11 – Schematic and full-scale image of a 3D printer

The dimensions of vessel model components during 3D printing are sufficient to print the hull in 4–5 approaches and several approaches (5–9) for other elements of the 3D model (Fig. 12).



Figure 12 – 3D printing processes of vessel models

The 3D model control system is used for creating detailed vessel models with actuators and onboard controllers. The use of PLA plastic for 3D printing with a diameter of 1.75 mm, which is sufficiently resistant to water, temperature, its physical and mechanical properties has significantly improved the durability and reliability of the 3D model.

To create physical models of vessels, equipped with actuators and on-board controllers, necessary equipment was purchased for field modeling of vessel traffic. Vessel models, created on a

3D printer, are equipped with an automated control system including sensors and mini-controllers. (Fig. 13).

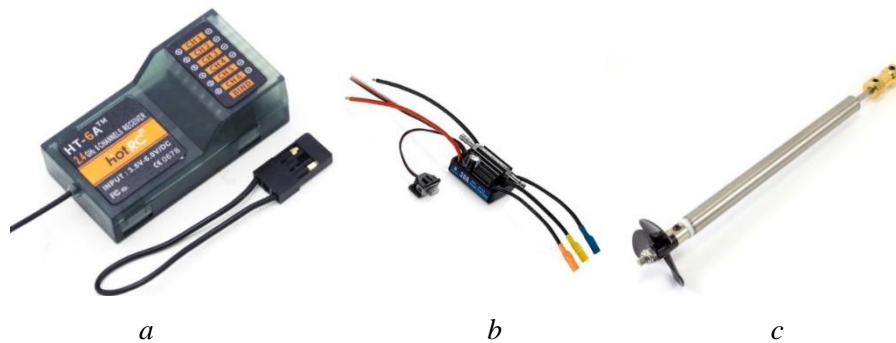


Figure 13 – A set of equipment for the current assembly of 3D vessel model:
a – transmitter/receiver; *b* – servomechanism; *s* – propeller

These models are valuable for testing complex navigational scenarios in field experiments, offering control visibility and cost-effectiveness.

Implementing these approaches in field research is crucial for forecasting and preventing maritime accidents. The next step is analyzing the feasibility of autonomous navigation technologies, particularly for smaller vessels (up to 1.5–2 meters). This involves examining sensors, algorithms, control systems, communication infrastructures, and interfaces, and adapting them to small vessel specifications.

A high-quality navigation system is essential for the proposed model, with sensors providing critical environmental data. The GPS system ensures precise location detection, essential for tasks like maneuvering and rescue operations. Autopilot systems offer enhanced navigation precision, distance coverage, and operation under challenging conditions. These systems are characterized by safety, obstacle avoidance, and efficient navigation in complex zones [21].

The radio-controlled model used the FS-i6X transmitter and the FS-iA6 receiver. The FS-i6X Transmitter, designed for remote control of vessels, offers stable connection and compatibility with multiple simulators. The FS-iA6 Receiver receives signals and controls the vessel model's servomechanisms [22]. Key features include stability, flexibility, and quality reception.

After configuring the radio control system, the model was waterproofed, ensuring operation within a 500 to 1500 meters range. Maneuverability was enhanced by additional channels in the FS-i6X. All components, including motors and sensors, were chosen for compatibility with the control system [23].

PID controllers were applied for stabilization and maneuverability, with a graphical interface displaying PID settings, maps, and diagnostic information. The vessel model's interaction with the marine environment and weather conditions was also considered vital. Research in real conditions, simulating scenarios, and testing control systems refine the model's operation, ensuring reliability and safety.

The radio control system's main components were scrutinized for compatibility and functionality. Integration with the controller and practical tests were conducted under various conditions. The ATmega2560 microcontroller was analyzed for potential integration of additional devices, alongside sensor testing and software ergonomics evaluation [24].

Development of autopilot systems for ship models, particularly those up to 2 meters, focused on compact sensors and algorithms. LIDARs, sonars, and miniature cameras were deemed essential, along with adapted trajectory planners and stabilization systems. Communication systems for data exchange and compact GPS modules were integrated, with wireless interfaces for interaction [25].

Therefore, the main aspects include the use of modern 3D printing for the development of vessel models, the integration of complex control systems, including sensors, PID controllers, and radio control. Besides the technical details, it is important to ensure practical testing and optimization for the safety and efficiency of the models. This approach has allowed for obtaining more accurate data for prediction and prevention of accidents in natural experiments.

Conclusions

The research aimed at developing autonomous navigation systems for maritime vessels primarily focuses on minimizing the negative impact of human factors in vessel management and fostering efficient software and hardware interaction with servers and onboard controllers. The methodology involves developing modules for refining management processes, creating simulation stands, and designing detailed 3D models, such as the MSC Panaya container ship.

Significant achievements include the creation of a detailed 3D model of the MSC Panaya, using advanced 3D printing technology and PLA plastic. This enabled the construction of physical models ready for field testing. The models, equipped with radio control systems, were made waterproof, maneuverable, and compatible with various components, functioning up to a distance of 500 meters. The application of PID controllers was crucial for stabilizing the vessel under diverse weather conditions. The research also explored approaches to optimize hardware components, including microcontrollers, sensors, and software.

Development of autopilot systems was a key focus, especially for ship models up to 2 meters, incorporating compact sensors like LIDAR, cameras, and sonars. Communication systems and integrated GPS modules were also considered vital for simplifying navigation and interaction.

The practical contribution of this study is reflected in the development of comprehensive technical solutions for optimal interaction of the ship model with aquatic environments. Experimental testing in real conditions and modern control systems have enhanced the efficiency and reliability of the model's operation.

Thanks to the developed complex, cadets were able to practice the main and most complex maneuvers regarding ship motion control in a real-world setting. It was determined that the speed of performing maneuvers on simulators increased by 11%. Additionally, obtaining terminal reactive indicators, individually tailored to each navigator, covered up to 63% of all operations. The limits of controllability of ship models were also identified, and conditions were determined in which it was proposed to switch to automatic control, which in 9% of cases prevented critical situations that could lead to the cessation of traffic in straits.

Future research prospects include further refinement of these technical solutions and their adaptation to real ship systems, thereby advancing the fields of maritime navigation and autonomous vessel control.

REFERENCES

1. Nosov, P., Zinchenko, S., Plokhikh, V., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Makarchuk, D., Mamenko, P., Moiseienko, V., & Ben, A. (2021). Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(112), 27–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239093>.
2. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Socol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
3. Ma, Xiaoxue & Shen, Jun & Liu, Yang & Qiao, Weiliang. (2020). A Methodology to Evaluate the Effectiveness of Intelligent Ship Navigational Information Monitoring System. *IEEE Access*. 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032543>.
4. Du, Lei & Valdez Banda, Osiris & Goerlandt, Floris & Huang, Yamin & Kujala, P. (2020). A COLREG-compliant ship collision alert system for stand-on vessels. *Ocean Engineering*. 218. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107866>.
5. Qiao, Weiliang & Ma, Xiaoxue & Liu, Yang & Lan, He. (2021). Resilience Assessment for the Northern Sea Route Based on a Fuzzy Bayesian Network. *Applied Sciences*. 11. <https://doi.org/10.3390/app11083619>.
6. Qiao, Weiliang & Liu, Yang & Ma, Xiaoxue & Lan, He. (2021). Cognitive Gap and Correlation of Safety-I and Safety-II: A Case of Maritime Shipping Safety Management. *Sustainability*. 13. 5509. <https://doi.org/10.3390/su13105509>.

7. Du, Lei & Valdez Banda, Osiris & Huang, Yamin & Goerlandt, Floris & Kujala, P. & Zhang, Weibin. (2021). An empirical ship domain based on evasive maneuver and perceived collision risk. *Reliability Engineering System Safety*. 213. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107752>.
8. Du, Lei & Goerlandt, Floris & Kujala, P. (2020). Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. *Reliability Engineering System Safety*. 200. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106933>.
9. Zhang, Mingyang & Conti, Fabien & Sourne, Hervé & Vassalos, Dracos & Kujala, P. & Lindroth, Daniel & Hirdaris, Spyros. (2021). A method for the direct assessment of ship collision damage and flooding risk in real conditions. *Ocean Engineering*. 237. 20. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109605>.
10. Yu, Qing & Teixeira, A.P. & Liu, Kezhong & Rong, Hao & Soares, Carlos. (2021). An integrated dynamic ship risk model based on Bayesian Networks and Evidential Reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*. 216. 107993. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107993>.
11. Zhang, Ting & Yang, Jing & Liang, Nade & Pitts, Brandon & Prakah-Asante, Kwaku & Curry, Reates & Duerstock, Bradley & Wachs, Juan & Yu, Denny. (2020). Physiological Measurements of Situation Awareness: A Systematic Review. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 001872082096907. <https://doi.org/10.1177/0018720820969071>.
12. Elidolu, Gizem & Uyanık, Tayfun & Arslanoğlu, Yasin. (2020). Seafarer personnel selection with Fuzzy AHP / 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2020) At: Antalya/Turkey.
13. Saeed, Farhan & Bury, Alan & Bonsall, Stephen & Riahi, Ramin. (2019). The application of AHP in the development of a taxonomy of merchant marine deck officers' non-technical skills (NTS). *Logistics & Sustainable Transport*. 10. 55–70. <https://doi.org/10.2478/jlst-2019-0005>.
14. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., & Popovych, I. (2023). Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. In *CEUR Workshop Proceedings (Vol. 3403, Paper 44, pp. 582–594)*. CEUR-WS.org.
15. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., & Gritsuk, I. (2022). Automatic Vessel Steering in a Storm. *ECCE*, 18(1), 66–74. DOI: 10.2478/ecce-2022-0009.
16. Bošnjak, Rino & Bukljaš, Mihaela & Medic, Dario & Vukša, Srđan. (2021). Scientific Journals *Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin Akademii Morskiej w Szczecinie* Proposal of new measures for risk assessment in navigation -a case study of the M/V Cosco Busan accident. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*. 67. 2021.
17. Zhou, Yangyu & Yang, Jiaxuan & Liu, Yuan & Liu, Jiaguo. (2020). Research on Time Characteristics of Near Miss in Bohai Sea. *IEEE Access*. 8. 207717-207735. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038795>.
18. Cepeda F. S., Maricruz & Monteiro, Gabriel & Moita, João Vitor & Caprace, Jean. (2018). Estimating possible near miss collisions based on AIS big data for the Port of Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17648/sobena-2018-87574>.
19. Altun, Murat & Kum, Serdar. (2019). Safety Indications of Navigation Audit for Tankers to Develop a Bridge Inspection Method. *Journal of Computer and Communications*. 07. 18–33. <https://doi.org/10.4236/jcc.2019.71003>.
20. Tarelko, Wieslaw & Rudzki, Krzysztof. (2020). Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption. *Neural Computing and Applications*. 32. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05111-2>.
21. TS2 Space. (n.d.). Retrieved from <https://ts2.space>.
22. FlySky. (n.d.). i6x Overview. Retrieved from <https://www.flysky-cn.com/i6x-gaishu-1>.
23. FlySky. (2016). FS-i6X User manual. Retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/5bc852d6b9144934c40d499c/t/5d6f66305487dc0001e34939/156758180055/FS-i6X+User+manual+20160817.pdf>.

24. Dronomania. (n.d.). Drone with your hands Lesson 4: Flight controller. Retrieved from <https://dronomania.ru/faq/dron-svoimi-rukami-urok-4-polyotnyj-kontroller.html>.

25. RC-Boat. (n.d.). [Product information]. Retrieved from https://rc-boat.ozp.biz/product_48.html.

Носов Павло, Зінченко Сергій, Нагрибельний Ярослав, Онишко Дмитро, Поліщук Вадим
РОЗРОБКА ТА 3D-ДРУК МОДЕЛЕЙ СУДЕН ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
РУХОМ

Мета дослідження полягає у підвищенні якості та безпеки морської навігації шляхом розробки автономних навігаційних систем, які пом'якшують негативний вплив людського фактору за допомогою розширеної інтеграції програмного та апаратного забезпечення з серверами та бортовими контролерами.

Ключовою проблемою, яка стоїть перед дослідниками, є мінімізація потенційно негативних наслідків людського фактору в контексті управління судном, а також розробка ефективних механізмів взаємодії програмного та апаратного забезпечення із серверами та бортовими контролерами.

У методологічному плані дослідження передбачає: а) розробку модулів для удосконалення процесів управління; б) створення симуляційних стендів для комплексного дослідження; і в) дизайн деталізованої 3D моделі контейнеровоза MSC Rapaya.

Основні результати нашого дослідження полягають у розробці детальної 3D моделі контейнеровоза MSC Rapaya, що створена на основі заводських креслень. З використанням передових технологій 3D друку та пластику PLA, вдалося створити фізичні моделі, готові до польового тестування запропонованих технічних рішень. Після вибору та налаштування радіокеруючої системи для моделі судна, було забезпечено її водонепроникність, маневреність та сумісність з іншими компонентами. Використовуючи обрану радіокеруючу систему, модель могла діяти на відстані від 500 метрів. Важливістю є застосування PID контролерів, які допомагають стабілізувати судно в умовах змінних погодних умов та морських течій. Додатково було вивчено підходи до оптимізації апаратних компонентів, включаючи мікроконтролер, сенсори, а також відповідне програмне забезпечення. Зробивши акцент на розробці автономних систем для моделей кораблів розміром до 2 метрів, було виявлено, що компактні сенсори, такі як LIDAR, камери та сонари, можуть бути особливо корисними для таких моделей суден. Крім того, системи комунікації, а також інтегровані модулі GPS, можуть спростити навігацію та взаємодію.

Практичний внесок дослідження виявляється в розробці та впровадженні комплексних технічних рішень, які спрямовані на оптимальну взаємодію моделі судна з акваторією, враховуючи динаміку погодних умов та особливості морської навігації. Експериментальне тестування в натуральних умовах та сучасні системи керування дозволили збільшити ефективність роботи моделі. Перспективи подальших досліджень передбачають додаткове удосконалення технічних рішень та їх адаптацію до потреб реальних судових систем.

Ключові слова: автономні навігаційні системи; людський фактор; ECDIS/AIS; 3D моделювання; радіокеруюча система; PID контролери; морська навігація.

© Nosov Pavlo, Zinchenko Serhii, Nahrybelnyi Yaroslav, Onyshko Dmytro, Polishchuk Vadym

Статтю прийнято
до редакції 28.10.2023

MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX

Plotnikov V. I., postgraduate student, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: vladplotnikov895@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1836-5462;

Dudchenko S. V., postgraduate student, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: manager@kmstc.org, ORCID: 0000-0002-1613-7226;

Abramov G. S., associate professor, PhD in physics and mathematics, deputy head of department for scientific work, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: gennadabra@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0333-8819;

Makarchuk D. V., associate professor, PhD in navigation, head of navigational department, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: m.dmytro1991@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4299-6614.

The article examines the navigational complex as a queuing system and defines the correlation between the difficulty of sailing conditions and system capability. A mathematical model for calculating the servicing probability was developed. Recommendations for necessary measures to maintain the appropriate level of system reliability are proposed. The implementation issues of the e-Navigation concept in the International Maritime Organization (IMO) are examined in this paper. In 2014, the IMO adopted the e-Navigation Strategic Implementation Plan (SIP). This plan aims to assess the impact of e-Navigation applications in reducing navigational accidents, such as ship collisions and groundings, as defined by the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). The expected outcome is a substantial decrease in such accidents, projected to be around 65 percent. The responsibility for the safety of navigation and efficient vessel traffic lies with the Member States of IMO, both at the international and national levels. In order to introduce new concepts and innovative systems into vessel traffic, it is essential to thoroughly evaluate their potential effects on both SOLAS ships and non-SOLAS ships. The objective of this paper is to provide a detailed and well-founded assessment of the potential benefits of e-Navigation. To achieve this, we will be exploring and utilizing the International Maritime Organization's (IMO) methodology for measuring these effects. Additionally, we will be examining the application of e-Navigation solutions to non-SOLAS ships, ensuring a comprehensive analysis. In this discourse, the issue encompassing the identification and resolution of faults in information measuring systems is deliberated upon. Considered are the methods used for reconditioning defective systems following information failures. It is recommended to enhance continuous measurements by incorporating specific attributes related to sailing conditions and the technical state of the systems.

Key words: navigation systems; queuing systems; system stability; technical factor; flow of requests; system failure and recovery; quadratic approximation.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.082–095

Introduction. The safety of maritime transportation depends solely on the secure condition of a ship's deck and machinery. Achieving this necessitates seafarers, analysts, and researchers to possess a robust technical knowledge and expertise. The reports from the Marine Accident Investigation Branch (MAIB) from 1993 to 2012 indicate that 6,692 maritime incidents have been attributed solely to technical factors, while 69% of incidents involved a combination of other factors. The technical factors encompass a range of aspects such as main/auxiliary/deck machinery, bridge procedures, maneuverability, collision/contact, electrical systems, fire and explosion precautions, flooding and foundering risks, general management and procedures, shipboard activities, grounding hazards, hazardous incidents, navigation and communication equipment, operational design considerations, pollution concerns, stability measures, structural integrity, safety equipment, and emergency response protocols, among others. Throughout human existence, one of the most widely recognized approaches has been to extract valuable insights from past undesirable events, which in turn helps individuals overcome potential recurrences [1].

The aim of the Strategic Implementation Plan (SIP) is to assess the impact of e-Navigation in order to minimize navigational incidents such as collisions and groundings, achieving a significant 65% reduction specifically for SOLAS vessels. The situation of maritime safety varies from country to country. In real maritime practices, SOLAS ships often come into contact with non-SOLAS ships. The practices for implementing e-Navigation may vary across countries due to

differences in their priorities, levels of readiness, and expected outcomes in applying it to their water areas. By establishing an effective and efficient National SIP, this aids member states in maximizing the benefits of implementing e-Navigation for their water areas.

National authorities are responsible for investigating and monitoring their respective situations concerning their national waters and shipping fleets. The authors of this paper present a novel approach for effectively evaluating the implementation of e-Navigation applications [2]. The focus of the method is to quantify the impact of e-Navigation solutions in terms of reducing accidents that can potentially be avoided with the use of e-Navigation applications. The method will be presented and examined through the Korean SMART-Navigation project, which offers e-navigation services for both non-SOLAS and SOLAS ships. This project serves as a model case for a comprehensive assessment of e-Navigation implementation, considering the unique circumstances and conditions of coastal states. Within the context of this project, specialized solutions are introduced in the form of e-Navigation toolkit applications. The presentation will unveil the results of extensive research conducted by the World Maritime University in collaboration with various partners. This research aims to identify the training requirements and user preferences necessary for the successful implementation of cutting-edge e-Navigation solutions in practical settings.

The integrated marine system encompasses several components, which include inertial navigation systems (INS), a receiver for satellite navigation system (SNS), a log, and a computer dedicated to processing and monitoring information. Anomalous gyro drifts and accelerometer biases are identified as the primary information failures observed in the INS sensors.

Analysis of recent research and publications. The literature extensively addresses the problem of detecting faults (FD) in information failures and the development of systems that can withstand these faults. The mathematical formulation of the problem related to information measuring systems (IMS) in the context of Fault Detection (FD) relies on the principles of statistical decisions. It involves conducting hypothesis tests to determine whether faults are present or absent within the system. Two classes can be distinguished among the methods employed to solve this problem - snapshot and sequential methods. The former relies on individual measurements for decision-making, whereas the latter requires a series of consecutive measurements. In this paper, we explore a method to solve an FD problem by utilizing a measurement sequence. To solve this type of problem, we need to introduce a dynamic model for the IMS errors in both the nominal state and faulty states, along with state transition models. As mentioned earlier, solving a combined problem of hypothesis testing and failure estimation is imperative. Using the posteriori probabilities of hypotheses, the system's fault tolerance is improved, as indicated by the weighted estimate of parameters [3].

The autonomous navigation function is supported by the system components identified, which ensure safe decision-making and execution. These components encompass route planning, voyage management, collision avoidance, and situation awareness. The absence of crew onboard to take control of navigation increases the risk of severe navigational accidents, including collisions with other ships, surface and underwater obstacles, and grounding. This risk is primarily caused by failures in the autonomous navigation system (ANS) software, hardware, and power supply. In order to guarantee the safety of the system under investigation, it is advisable to incorporate backup measures for the essential ANS components, such as software, hardware, power supply source, Echo Sounding System, ECDIS, and microphone [4–7].

The redundancy of safety-critical systems or sensors may indeed ensure sufficient safety levels for complex systems like the ANS. However, this method is not the most cost-effective option. In order to enhance performance and efficiency, it is advisable to incorporate upgraded versions of vital components and sensors that offer longer mean time between failure (MTBF). Additionally, employing intelligent software like health monitoring for sensors can help in timely detection of issues and scheduling necessary maintenance tasks. In conclusion, the safety levels of the conceptual software mentioned in the investigated system must be defined through validation and verification [8, 9].

Purpose and objectives of the research. In today's era, the prevalence of surplus equipment is more frequent than its scarcity, and this is frequently reasonable. The navigation equipment malfunction can cause significant financial loss for both the shipowner and the shipper, which is not desirable considering the high value of the cargo and the ship. The cost of the equipment itself is relatively small compared to the overall expenses involved [10].

A well-established method for evaluating the efficiency of technical systems is through the use of queueing system theory. This theory enables us to calculate the probabilities of different conditions within queueing systems (QS) and ascertain the relationships between specific parameters of QS and their effectiveness measures.

Given that all channels in the system are basic, the processes the QS is currently experiencing can be described as a Markov random process. This process consists of discrete states and occurs over continuous time. In the event that the process satisfies the ergodicity conditions, a final stationary mode is attained. In this mode, the probabilities of states and other process parameters remain unaffected by time. Researchers often find themselves focusing on these well-established and long-standing traits for their study [11].

The ship officer's job will be analyzed as a single-channel QS that has a tendency to fail. To begin, it is essential to acknowledge that the officer has the responsibility of managing various streams of requests. While on duty, he must not only pay attention to the surrounding environment but also record approximately 10 parameters including course, speed, power, and various others. Neglecting failure states in others may be a consequence of focusing all attention on one. Decisions will have to be made promptly in these circumstances, inducing stressful scenarios that might lead to errors.

Main body. The irregular flow of applications and their varying service time cause the QS to be loaded inconsistently. There are instances where unserved orders accumulate at the input, resulting in an overloaded QS. Conversely, there are situations where the QS entrance has available channels but no applications, leading to an underloaded QS and idle state of its channels. The entrance of the QS is where orders pile up. These orders have two possible outcomes: they either join the queue or, if it is not possible for them to wait any longer in the queue, they will leave the QS without being served [12].

Consequently, there is a possibility for the working channel (ship officer) to encounter glitches and cease functioning to some extent. This can be triggered by various factors such as illness, loss of consciousness, or extreme stress leading to a mental freeze-up. The capability to swiftly evaluate the circumstances and make prompt judgments is inadvertently diminished.

Once a channel malfunctions, the recovery process commences promptly after the occurrence. This may manifest as regaining consciousness, consuming appropriate medication to remedy an illness, or successfully recovering from a lock-up event.

The birth-death graph represents the system's states and is depicted as follows:

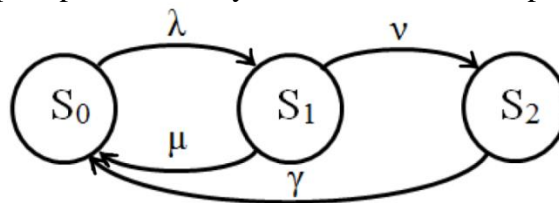


Figure 1 – QS state graph

where S_0 – channel is free;

S_1 – channel is busy (working), good;

S_2 – channel failed, restored.

Allow the most basic flow of requests to reach its input with an intensity denoted by λ . Service time – exponential with parameter $\mu = \frac{1}{\bar{t}_{\text{обсл}}}$, where $\bar{t}_{\text{обсл}}$ – average request service time. This implies that the service flow is the most uncomplicated, namely, a stationary Poisson process can be

described by an intensity parameter, denoted as μ . There is a possibility that a functional channel may fail – decline. Let us make the assumption that the intensity v is at its simplest form in relation to the flow of failures. Immediately after a channel failure, the process of channel recovery commences. The repair time for the channel follows an exponential distribution characterized by a parameter known as intensity $\gamma = \frac{1}{t_p}$, where t_p – average recovery time (repair). In [11], the problem was expressed in a similar manner, focusing on the navigator as a service channel. In the present study, the complexity of the problem arises from considering the potential occurrence of a channel failure and its impact on an idle state, denoted by an intensity v' . It is reasonable to assume that $v' < v$ [13].

The graph representing the QS status will exhibit the following appearance:

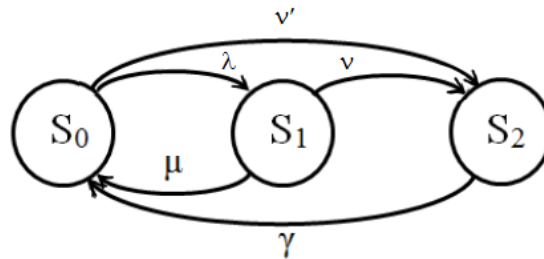


Figure 2 – QS state graph with failure possibility during idle

Theory of system reliability has various approaches towards considering the reliability of complex equipment, such as navigational systems or ship machinery. Failure mode effect and criticality analysis (FMECA) is extensively used in maintenance and risk analysis to ensure a comprehensive comprehension of potential failures, their causes, and possible corrective measures [14]. This approach outlines the ways in which things can go awry, identifies the reasons behind these failures, and offers insights into rectification or mitigation strategies. The Criticality Analysis (CA) is used to identify events, occurrences, or components that require greater attention to prevent more severe or catastrophic situations [15]. FMECA offers a systematic methodology to comprehensively understand the causes and effects of failures on a specific equipment or system, following a bottom-up perspective. Measuring criticality through FMECA aids in identifying the most crucial component failure, thus supporting maintenance actions and planning by uncovering explicit information. Subjective operator inputs were collected using FMECA, which can be described in two ways. One aspect to focus on is the assessment of operator sentiments and priorities, particularly regarding failures and maintenance challenges. This includes analyzing factors like expertise and identifying reasons behind prolonged downtimes. Additionally, this technology served the purpose of identifying crucial faults in maintenance and machinery components. In terms of writing, the second aspect involved the validation of crucial components acquired through qualitative analysis using DFTA. In order to achieve these two goals through FMECA analysis, a questionnaire was created and disseminated using the Qualtrics survey software.

The main objective of the survey was to identify the components that pose the biggest challenge to carrying out maintenance work onboard, by utilizing the risk priority number (RPN) [16]. The RPN employs three categorical variables, namely identification, severity, and likelihood. These variables are typically measured on a linear scale that reflects their increasing importance. The scale used for the analysis is presented in Table 1, which shows the linear scale and the Likert scale, including color codes representing the corresponding scale values [17, 18].

The Risk Priority Number (RPN) is determined by considering the severity of the failure's impact, the probability of its occurrence, and how easily it can be detected for each failure mode. In accordance with the following formula, RPN is obtained by multiplying these three numbers:

$$RPN = S \times P \times D \tag{1}$$

where S – the severity of the effect of failure;
 P – the probability of failure;
 D – the ease of detection.

Although RPN may not have a significant impact on deciding the course of action against failure modes, it can assist in identifying the threshold values that determine the areas requiring the most attention. To put it differently, the analysis and corrective action should prioritize failure modes with a high RPN number [19].

Table 1 – Definition of Criteria

<i>Linear scale (1–10)</i>	<i>Severity Level</i>	<i>Criticality Level</i>	<i>Likelihood Level</i>	<i>Failure Rate</i>
1	Minor: Failure or event that has little or no significant impact to system capability and availability.	Minor: A component failure or event that has no immediate impact on platform or personnel safety.	Remote: Failure is unlikely.	10^{-5} – 10^{-6}
2–3	Low: Failure or event that could cause slight deterioration of system capability but will not affect it availability. System may require minor repair action.	Low: Failure or event that could cause slight delay/deterioration system capability but will not affect its availability.	Low: Isolated failure associated with component or equipment.	10^{-4} – 10^{-5}
4–6	Marginal (Moderate): Failure could result to deterioration in system capability which may require unscheduled repair or may cause minor health hazard or injury to the user.	Marginal (Moderate): A failure that could result to deterioration in system capability and availability which may require unscheduled repair that can be conducted by ship staff.	Moderate: Occasional failure but not in major proportions.	10^{-3} – 10^{-4}
7–8	Critical (High): Failure causes loss of system capability and availability or may cause a serious health hazard or serious injury to the user.	Critical (High): Failure that results to loss of system capability and can influence the efficient operation of other systems.	High: Generally associated with components or system which often fail.	10^{-2} – 10^{-3}
9–10	Major (Very High): A potential failure could cause complete system loss and/or death of user(s). A failure event which may lead to extended downtime due to spare parts or OEM assistance.	Major (Very High): A potential failure could cause complete system loss that will require FSG or OEM assistance.	Very High: A component or equipment with very high failure rate,	10^{-1} – 10^{-2}

Results of research. We shall proceed to determine the ultimate probabilities of the system's states as well as the attributes of its effectiveness: A , denoting absolute throughput, and Q , representing the relative throughput (the probability of successfully handling an incoming request).

The final probabilities of states in the algebraic system of equations, derived from the Kolmogorov differential equations by setting the left-hand side (state probability derivatives with respect to time) to zero, can be expressed as follows:

$$\begin{aligned}
 (\lambda + v')p_0 &= \mu p_1 + \gamma p_2 \\
 (\mu + v)p_1 &= \lambda p_0 \\
 \gamma p_2 &= v p_1 + v' p_0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Additionally, the condition of normalization to unity can be incorporated into this system:

$$p_0 + p_1 + p_2 = 1
 \tag{3}$$

The task is to discover the intended ultimate probabilities:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu + \nu} + \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu + \nu} p_0 \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} p_0 \quad (6)$$

In order to determine the relative throughput, we apply the principles stated in [10] and obtain:

$$Q = p_0 \frac{\mu}{\mu + \nu} \quad (7)$$

Absolute throughput:

$$A = \lambda Q = p_0 \frac{\lambda\mu}{\mu + \nu} \quad (8)$$

After simplifying the expression for Q, it can be written in a form suitable for numerical calculation as follows:

$$Q = \frac{\mu\gamma}{(\mu + \nu)(\gamma + \nu') + \lambda(\gamma + \nu)} \quad (9)$$

The servicing probability of the incoming request Q is determined by five parameters. These parameters are the intensities of the corresponding flows: λ , μ , γ , ν и ν' .

We will now calculate the value of Q for different combinations of the parameters mentioned above.

The calculations for probabilities of incoming request fulfillment under various sailing conditions and intensities of incoming request streams, failure streams, and recovery streams can be seen in Figures 3–8.

Figures 3–4 illustrate the correlations observed during favorable sailing conditions, specifically in open seas and oceans. The intensity of the request stream increases from 2 to 6 per hour, resulting in a decrease in the probability of fulfilling the requests. To achieve a high probability Q (nearing 1), one can enhance the capacity of both the servicing channel and recovery channel.

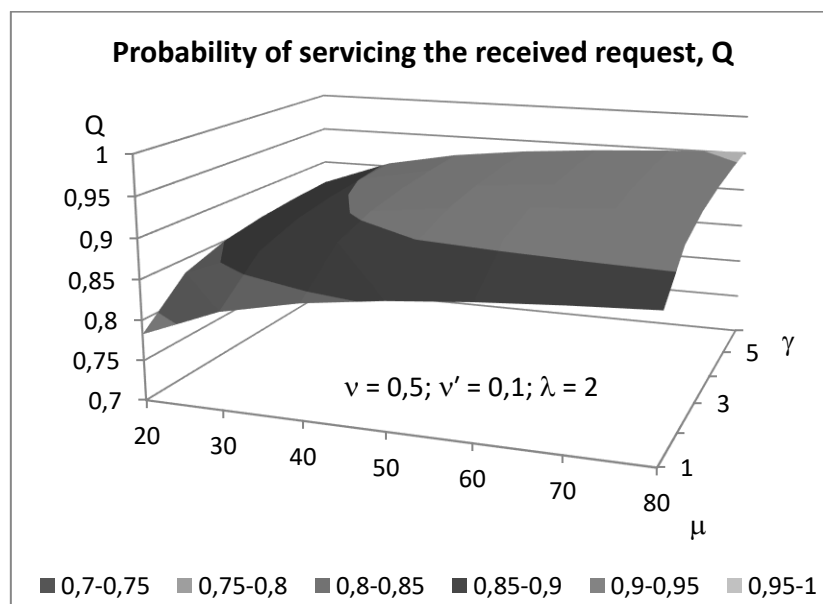


Figure 3 – The correlation between Q and λ , μ , γ , ν , ν' . The intensities of the corresponding streams are as follows: $\nu = 0,5$ per hour; $\nu' = 0,1$ per hour; $\lambda = 2$; μ from 20 to 80 per hour; γ from 1 to 6 per hour

$$Q_T = 0,6824 \pm 0,0079 + (0,0474 \pm 0,0029)\gamma + (-0,0047 \pm 0,0004)\gamma^2 + (0,0041 \pm 0,0003)\mu + (-2,7579 \times 10^{-5} \pm 0,2881 \times 10^{-5})\mu^2$$

$$R^2 = 0,9765; \sigma = 0,0065.$$
(10)

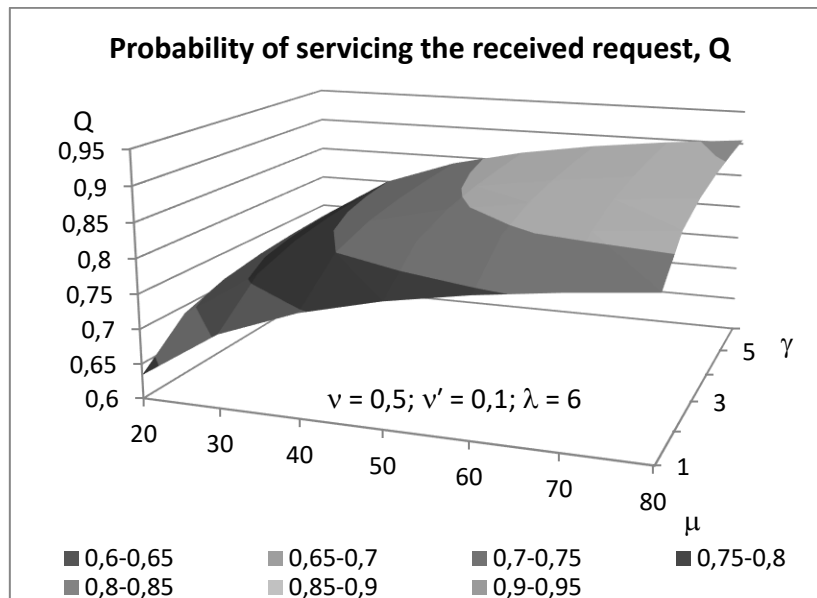


Figure 4 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding streams are as follows: v = 0,5 per hour; v' = 0,1 per hour; λ = 6; μ from 20 to 80 per hour; γ from 1 to 6 per hour

$$Q_T = 0,4641 \pm 0,0104 + (0,0525 \pm 0,0038)\gamma + (-0,0052 \pm 0,0005)\gamma^2 + (0,008 \pm 0,0004)\mu + (-5,2609 \times 10^{-5} \pm 0,3793 \times 10^{-5})\mu^2$$

$$R^2 = 0,9855; \sigma = 0,0085.$$
(11)

The correlations for sailing in coastal zones are shown in Figures 5–6. In this scenario, the failure stream's intensity increases to 1 while the request stream's intensity ranges from 10 to 20. Consequently, the chances of fulfilling requests decrease when compared to the previously mentioned data.

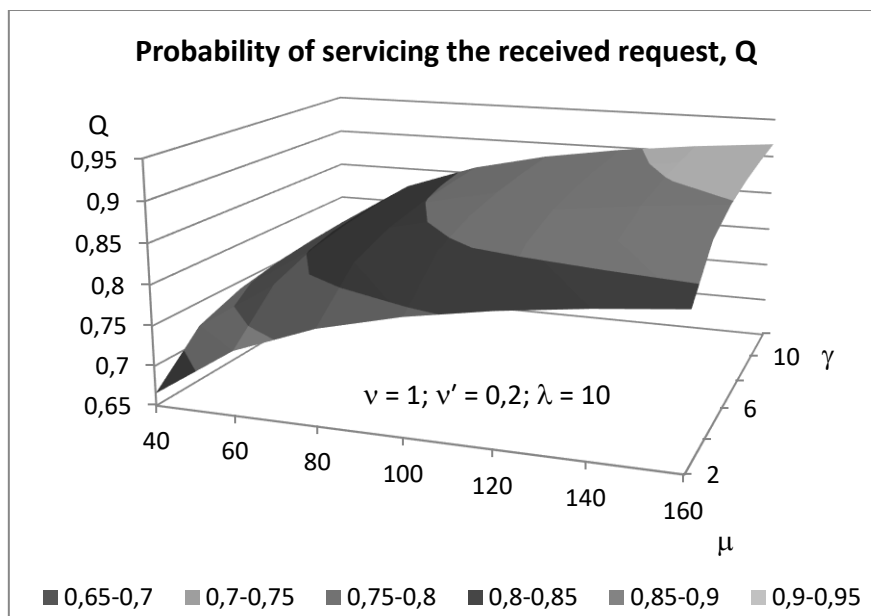


Figure 5 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding streams are as follows: v = 1 per hour; v' = 0,2 per hour; λ = 10; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = 0,5098 \pm 0,01 + (0,0258 \pm 0,0018)\gamma + (-0,0013 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0036 \pm 0,0002)\mu + (-1,2002 \times 10^{-5} \pm 0,0912 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (12)$$

$$R^2 = 0,9839; \sigma = 0,0082.$$

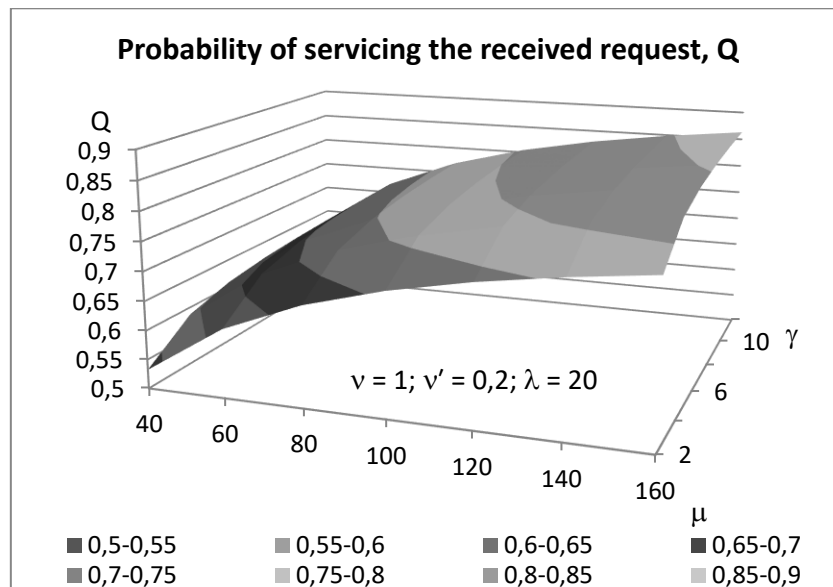


Figure 6 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding streams are as follows: v = 1 per hour; v' = 0,2 per hour; λ = 20; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = 0,3222 \pm 0,011 + (0,0275 \pm 0,002)\gamma + (-0,0014 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0051 \pm 0,0002)\mu + (-1,6011 \times 10^{-5} \pm 0,101 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (13)$$

$$R^2 = 0,9897; \sigma = 0,0091.$$

In challenging navigation conditions such as rivers, ports, dense traffic, and poor visibility, Figure 7–8 illustrates the correlations observed for sailing. The failure stream's intensity is augmented to 5, while the request stream ranges from 20 to 40, leading to a further reduction in the likelihood of a request being fulfilled, as compared to the previous data.

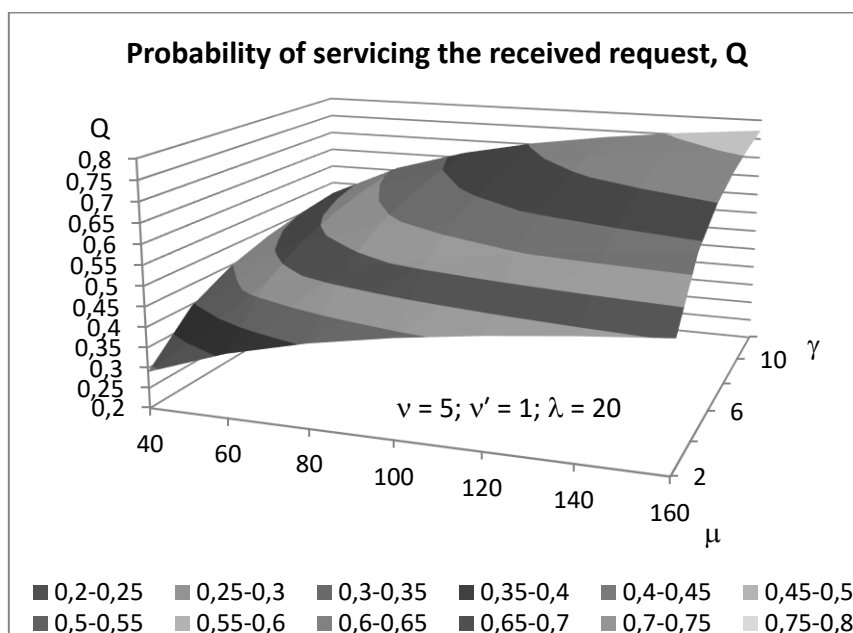


Figure 7 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding streams are as follows: v = 5 per hour; v' = 1 per hour; λ = 20; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = -0,0095 \pm 0,0163 + (0,0667 \pm 0,003)\gamma + (-0,0031 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,0049 \pm 0,0003)\mu + (-1,5023 \times 10^{-5} \pm 0,1487 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (14)$$

$$R^2 = 0,989; \sigma = 0,0134.$$

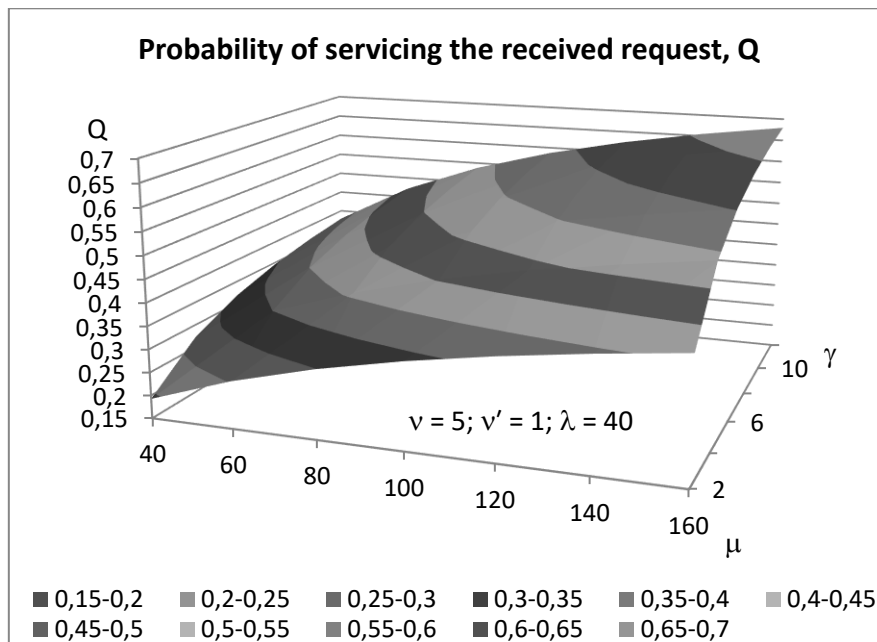


Figure 8 – The correlation between Q and λ , μ , γ , v , v' . The intensities of the corresponding streams are as follows: $v = 5$ per hour; $v' = 1$ per hour; $\lambda = 40$; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = -0,1196 \pm 0,0171 + (0,0604 \pm 0,0031)\gamma + (-0,0027 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,005 \pm 0,0003)\mu + (-1,3831 \times 10^{-5} \pm 0,1561 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9886; \sigma = 0,014.$$

The equations below each graph are derived by applying the square two-factor approximation method. A high level of determination coefficients ($R^2=0,98-0,99$) indicates that the received statistical square models are highly adequate. The square regressions exhibit remarkably low standard deviations ($\sigma=0,006-0,014$), indicating their exceptional accuracy. Consequently, these models can be confidently employed to obtain highly dependable probability assessments [20].

The data are also consistent with the following recommendations for the operation of bridges in various difficult navigation conditions [21].

Table 2 – Watch conditions on the bridge as they relate to sailing conditions

	<i>Open Water</i>	<i>Restricted Water, Anchoring, Embarking or Disembarking a Pilot</i>	<i>Entering or Leaving Port</i>
Clear weather, little or no traffic	I	II	III
Clear weather, heavy traffic	II	II or III	III
Restricted visibility, little or no traffic	II	II	III
Restricted visibility, heavy traffic	II or III	II or III	III
Pilotage	I	I or II	II or III

Bridge Watch Condition – I

In order to comply with this condition, it is necessary to have both an Officer of Watch and a Lookout present on the bridge.

The Officer of Watch carries out regular watchkeeping responsibilities, and occasionally assumes the role of the only lookout during daytime. In circumstances that call for manual steering, it is important to note that the helmsman cannot fulfill the role of the lookout. Therefore, it is necessary to assign an extra crew member as a dedicated lookout. The engine room has the capability to operate in both manned and unmanned modes.

Bridge Watch Condition – II

In order to meet this requirement, it is necessary for the following individuals to be present on the bridge: the Master or Chief Officer, the Officer of Watch, the Lookout, and the Helmsman.

The safe navigation and overall watch organization of the crew is supervised by the Master or Chief Officer. Assisting the Master or Chief Officer, the Officer of Watch relays pertinent information, navigates the ship, and monitors the implementation of orders. In situations deemed necessary by the officers or when faced with challenging conditions such as high traffic, limited visibility, port maneuvers, or boarding a pilot, the Helmsman takes control of the vessel's steering manually.

It is essential for the engine room to have a staff available at all times, but it is ultimately up to the Master to decide whether to assign personnel to it or not.

Bridge Watch Condition – III

In order to meet this condition, it is necessary to have the following personnel present on the bridge: the Master, Officer of Watch, Additional Officer, Lookout, and Helmsman.

In case of condition III, the Officer of Watch is relieved of collision monitoring responsibilities, and an Additional Officer assumes this duty by utilizing AIS/ARPA systems. They provide the Officer of Watch with relevant navigational information and data concerning nearby vessels. It is essential to have personnel present and ready in the engine room.

Of interest is the Korean experience in implementing e-navigation systems. The Korean implementation of the IMO e-navigation concept, known as SMART-navigation, is applied to Korean waters and on Korean-affiliated ships. In addition to the IMO e-navigation scope, SMART-navigation extends its services to non-SOLAS ships such as fishing vessels and non-fishing vessels operating in domestic coastal areas. This assumption arises from various reasons, primarily because non-SOLAS ships are more susceptible to accidents compared to SOLAS ships. This susceptibility can be attributed to inadequate navigational equipment, increased workload on board, and limited safety information from shore based stations.

The aim of SMART-Navigation is to offer non-SOLAS ships with extra specialized services, alongside the services provided by IMO e-navigation. The primary objective of the services is to anticipate and prevent possible causes of accidents. This is achieved through proactive support and management of areas that are deemed susceptible to accidents. These determinations are made by analyzing real-time statistics and local situation data, both of which are obtained from shore-based stations. These services encompass:

- Supporting decision-making to prevent accidents is crucial.
- Analyzing maritime safety factors utilizing Big Data.
- Ships, which are at risk of accidents, can receive safety information that is provided to them.
- Providing a streaming service of electronic nautical charts (ENCs).
- Remote support and management of safety training crews is essential for efficient operations.
- The ability to effectively identify and react to all maritime sectors in every region of the Korean waters is imperative.
- Giving information about the activities of illegal unreported unregulated fishing.
- Sharing details on the oil spill.
- Supporting measures to prevent ships from illegally discharging wastes and pollutants.

– Providing assistance for the various endeavors concerning maritime security.

To accomplish these goals, the objective of SMART-navigation is to establish the LTE-Maritime communication network as a foundation for non-SOLAS ships to enable the deployment of essential e-navigation services. Furthermore, the communication networks that are necessary for e-navigation services will be equipped with a data structure reliant on the Common Maritime Data Structure (CMDS). This data structure will incorporate the VHF Data Exchange (VDE), as well as digital HF/MF and satellite-based communication [22].

In order to assess the impact of SMART-navigation in reducing accidents [2], the authors conducted a comprehensive analysis of accident data in Korean waters for all ships and Korean-flagged ships globally from 2009 to 2013. The data presented in this work was obtained from the Korea Maritime Safety Tribunal (KMST). According to the analysis, a total of 4,871 accident vessels were examined. From this, the authors identified 3,366 accident vessels that specifically addressed the detailed direct causes that can be prevented through the Risk Control Options (RCOs) offered by e-navigation.

Table 3 – The ranking of RCOs based on the potential loss of lives (taken from: Annex 1 of NAV 59/6 (p. 37))

Accident Type				Human Errors	Technical Failure	External Factor	Total	
							Actual	Effect
Non-Fishing Vessels	Navigational Accident	SOLAS	Actual %	465 (13,8%)	–	14 (0,4%)	828 (24,6%)	14,8%
			Risk Reduction Rate	65,1%	–	65%		
			Effect	8,9%	–	0,3%		
		Non-SOLAS	Actual %	338 (10,0%)	–	11 (0,3%)		
			Risk Reduction Rate	55,1%	–	55,0%		
			Effect	5,5%	–	0,1%		
Non-Fishing Vessels	Non-Navigational	SOLAS	Actual %	163 (4,8%)	37 (1,1%)	4 (0,1%)	353 (10,5%)	6,2%
			Risk Reduction Rate	65,3%	64,9%	65%		
			Effect	3,1%	0,7%	–		
		Non-SOLAS	Actual %	119 (3,5%)	27 (0,8%)	3 (0,1%)		
			Risk Reduction Rate	55,2%	54,9%	55%		
			Effect	1,9%	0,4%	0,1%		
	Sum		Actual %	1,085 (32,2%)	64 (1,9%)	32 (0,95%)	1,181 (35,1%)	21,0%
			Effect	19,4%	1,1%	0,5%		
	Fishing Vessels	Navigational Accident	Actual %	1,155 (34,3%)	2 (0,1%)	16 (0,5%)	1,173(34,8%)	19,1%
Risk Reduction Rate			54,9%	55%	54,9%			
Effect			18,8%	–	0,3%			

Source: KMST investigation statistics and data base (2014).

Table 3 exhibits the impact of SMART-navigation in mitigating accidents. This evaluation was conducted by employing the suggested formula derived from the analysis of accident data. The reduction is anticipated to exceed 56,6% of the total accidents involving 3,366 vessels, comprising 13% of SOLAS ships and 43,6% of non-SOLAS ships, specifically fishing vessels. It is anticipated that there will be a reduction of over 33.9% in navigational accidents. This includes a decrease of 14,8% for non-fishing vessels and 19,1% for fishing vessels. It is anticipated that there will be a decrease of up to 22,7% in accidents, even those that do not involve navigation. This reduction includes a 6,2% decrease for non-fishing vessels and a 16,5% decrease for fishing vessels. The expected reduction in accidents caused by human error is 50,2%. Meanwhile, accidents caused by technical failures are anticipated to be reduced by 5,4%, and accidents caused by external factors by 1%.

Conclusions. By analyzing the simulation results, one can ascertain the impact of the initial parameters on the likelihood of fulfilling an incoming request. Consequently, it becomes feasible to anticipate the stability of the components within the navigation system. The obtained results provide the opportunity to develop suitable recommendations for enhancing the functional stability of the navigation complex. The simulation results demonstrate that as the failure rate intensifies and the request rate increases, the fulfillment probability of incoming requests drastically declines. Consequently, the performance of the navigation complex is affected.

Due to a significant decrease in the chances of failure-free operation of the equipment, it is crucial to plan for the swift replacement of failed modules and blocks in the navigation system. This approach will greatly amplify the pace of restoration. Moreover, in critical situations, it is imperative to establish a "hot standby" to guarantee uninterrupted functioning of the navigation complex.

Alternatively, there is a risk of disconnecting internal components within the system. The gyrocompass, for instance, lacks data on the vessel's speed, causing a deviation in its indicators. If an operator lacks comprehensive understanding of the system's structure and its elements, they will be unaware of this fact. Consequently, it may result in errors while controlling the vessel.

In this manner, by developing the navigation system stability model, it becomes possible to simulate different emergency situations. The simulation revealed the correlation between the system's performance and its parameters: λ , μ , γ , v , v' . Contrarily, the system boasts an extensive array of internal connections. Incorrect operation of the system can occur if any one of them is violated.

The research findings highlight the importance of determining the adequate level of duplication for navigation devices to ensure system reliability. If the Q value drops below 0.7, it poses a critical situation onboard the ship. The probability of meeting the request varies based on the sailing's navigational conditions, illustrated in Figures 3–8. Consequently, it becomes necessary to implement measures that guarantee the stability of the navigation system during challenging circumstances.

The study findings have the potential to enhance comprehension regarding the associated dangers and their corresponding levels of risk. Despite the growing interest in this area, as evidenced by the rising number of publications, it is crucial to recognize the scarcity of literature and emphasize the necessity for further research. A recommendation is to adopt a comprehensive hazard analysis, categorizing hazards with greater detail. This approach allows for deeper evaluation of the contributing factors, resulting in more specific and efficient risk management strategies.

REFERENCES

1. Yip, Tsz L., Sahin, B. (2020). Technical factor in maritime accidents: an index for systematic failure analysis. *IAME 2020 Conference*, 1–11. doi: 10.17632/8p9hsvfmx.2.

2. Baldauf, M., Hong, S.-B. (2016). Improving and assessing the impact of e-navigation applications. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 4, 1–12. doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.
3. Dmitriev, S. P., Osipov, A. V., Koshaev, D. A. (2006). Detection of information failures in marine navigation systems and their reconditioning. *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 39(13). doi: 10.3182/20060829-4-CN-2909.00248.
4. Felski, A., & Zwolak, K. (2020). The Ocean-Going Autonomous Ship – Challenges and Threats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 41.
5. Wróbel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2018a). System-theoretic approach to safety of remotely-controlled merchant vessel. *Ocean Engineering*, 152, 334–345.
6. Wróbel, K., Krata, P., & Montewka, J. (2019). Preliminary results of a system-theoretic assessment of maritime autonomous surface ships' safety. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13(4).
7. T.-W. Lee, P., Bolbot, V., Theotokatos, G., Boulougouris E. & Vassalos, D. (2021). Fault tree analysis of the autonomous navigation for maritime autonomous surface ships. *Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles*, 1, 1–10.
8. Aksu, S. (2019). Assessing compartment-wide damage consequences in ships and offshore vessels using Fault Trees with System Location Attribution. *Ocean Engineering*, 192, 106510.
9. Banda, O. A. V., Kannos, S., Goerlandt, F., van Gelder, P. H., Bergström, M., & Kujala, P. (2019). A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106584.
10. Ivanov, A. A. & Ivanovsky, N. U. (2013). Study of the stability of the navigation system of a sea vessel. *Information and control systems*, 1/9(61), 65–68.
11. Abramov, G. S., Makarchuk, D. V., Nosov, P. S. & Zinchenko, S. M. (2021). The ship officer as a failure-prone single-channel queueing system. *Materials of the 13th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2021)"*, 13, 157–162.
12. Aubakirov, S. K. & Selivyorstov, P. Y. (2016). System of mass service. Post capacity. *Bulletin of Science and Education*, 6(18), 44–47.
13. Abramov, G. S., Makarchuk, D. V. & Plotnikov, V. I. (2023). Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS. *Materials of the 15th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2023)"*, 15, 244–249.
14. Rausand, M., Hoyland, A. (2021). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Application*. Wiley.
15. Melani, A. H. A., Murad, C. A., Caminada Netto, A., Souza, G. F. M.d., Nabeta, S. I. (2018). Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant. *Energy*, 147:767–781. doi: 10.1016/j.energy.2018.01.048.
16. Daya, A. A., Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 1–17. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113766.
17. Jeong, B., Lee, B. S., Zhou, P., Ha, S.-m. (2018). Quantitative risk assessment of medium-sized floating regasification units using system hierarchical modelling. *Ocean Engineering*, 151:390–408.
18. Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. *Safety Science*, 49 (6), 852–860.
19. Kiran, D. R. (2017). Failure Modes and Effects Analysis. *Total Quality Management. Key Concepts and Case Studies*, Butterworth-Heinemann, 373–389. doi: 10.1016/B978-0-12-811035-5.00026-X.
20. Abramov, G. S., Plotnikov, V. I. & Zinoviev, V. I. (2023). Analysis of the reliability of the navigation complex and its influence on the functioning of the maritime logistics system.

Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference “Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects”, 1, 17–29.

21. Columbia Shipmanagement (2018). *Bridge Operations Manual BOPR-01.2.*

22. Ministry of Oceans and Fisheries (2015). *The study on systems to prevent safety accidents in maritime sectors*, Seoul: Author.

Плотніков В. І., Дудченко С. В., Абрамов Г. С., Макаrchук Д. В. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

У статті досліджено навігаційний комплекс як систему масового обслуговування та визначено співвідношення між складністю умов плавання та можливостями системи. Проведено математичне моделювання та аналіз надійності навігаційного комплексу судна з точки зору теорії масового обслуговування. Представлена робота є однією з піонерських по застосуванню теорії масового обслуговування для аналізу проблем безпечного судноводіння, що забезпечує її актуальність і наукову новизну. Розроблена математична модель доведена до чисельних експериментів і проведена візуалізація отриманих результатів та їх математична обробка шляхом побудови квадратичних апроксимаційних рівнянь, що зв'язують вірогідність робочого стану систем з відповідними інтенсивностями потоків відмов і обслуговування. Математичне моделювання проведено для різних умов складності судноводіння (від відкритого моря, до каботажного плавання і припортових маневрувань). Це забезпечує і високу практичну значимість наведених результатів моделювання при розробці відповідних регламентів судноводіння і при виконанні оцінок потенційних переваг електронної навігації.

Ключові слова: системи навігації; системи масового обслуговування; стійкість системи; технічний фактор; потік запитів; потік відмов; потік обслуговування; відмова та відновлення системи; квадратична апроксимація.

© Plotnikov V. I., Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V.

Статтю прийнято
до редакції 27.10.2023

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ GaAs СПОЛУК В МОДУЛЯХ ОРІЄНТАЦІЇ ОРБИТАЛЬНИХ МЕТЕОСУПУТНИКІВ

Крапивко Г. І., к.т.н., доцент Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: krgniv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8165-1213.

За допомогою позиційно-чутливих фотоприймачів (ПЧФ) на базі сполук GaAs можна безконтактним способом дистанційно реєструвати процеси переміщення та керувати ними. Типовим прикладом застосування є реєстрація переміщення або вібрації будь-якої конструкції, за допомогою сонячного променя або лазера, що спрямовується на датчик. Відхилення променя від центру датчика внаслідок переміщення або вібрації може бути виміряно з великою точністю $0,5^\circ$. Це дуже важливо в концентраторних енергетичних системах, виготовлених за допомогою лінз А. Fresnel. Плюси цієї технології беззаперечні ($400\text{W}/\text{m}^2$), але точність нормалі сонячного випромінювання 5° , далі різке падіння ефективності. У концентраторних космічних системах, додатково дуже важлива робоча $t^\circ = -200 + 400^\circ\text{C}$. Для реєстрації переміщень або вібрації різних механізмів – зазвичай у досліджуваному місці механізму встановлюють світлодіод (випромінювач світла), випромінювання якого фокусується на середину ПЧФ, так що сигнал з датчика без вібрації (механізм вимкнений) дорівнює 0. Як тільки світло починає переміщатися з-за переміщення або вібрації механізму, сигнал з ПЧФ виявляється пропорційним до рівня вібрації механізму, який можна оцінювати при різних режимах роботи. Метою даної роботи є дослідження порівняльних характеристик можливості використання одно та двокоординатних фотоприймачів на основі з'єднань GaAs (на відміну від CdSe та CdS) у модулях орієнтації штучних метеосупутників Землі, щоб унеможливити вихід з ладу відикону фотореєстратора.

Ключові слова: супутникові метеорологічні системи; GaAs; фотоприймачі; орієнтація.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.096–106

Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Запущений у березні 2022 р. метеорологічний супутник GOES-17 мав проблему – інфрачервона камера нового покоління працює лише частково через те, що погано охолоджується. Одна команда інженерів NASA намагалась скоротити періоди неповної працездатності, а друга – встановити причину проблеми. Обидві завдання важливі, тому що аналіз телеметрії попередника, GOES-16, показав, що там також є ознаки ненормальної роботи системи охолодження, і схоже, четверте покоління метеорологічних супутників GOES 18, 19, 20 зіштовхнуться із такою ж системною проблемою [1]. Рішення спеціалістів NASA веде до збільшення охолодження відикону. Це одне із правильних рішень. Однак ідея цього дослідження полягає у виявленні причин попаданні сонячної корони на навантаження (основну камеру метеосупутника, рис.1). У даному випадку розглядається розподіл осі відеокамер від нормалі роботи сонячних батарей, за рахунок позиційно чутливих датчиків на основі сполук GaAs.

Одним із перспективних розробок є напрямок досліджень технології виробництва оптико-електронних датчиків кутової швидкості обертання (КШО) та кутового переміщення. Основними вимогами до таких датчиків є висока чутливість, точність, компактність та економічність. Для вимірювань малих кутових швидкостей з високою точністю створені гіроскопи різних типів, найбільш високочутливими є гіроскопи на ефекті Саньяка [2].

Оптико-електронні позиційно-чутливі фотоприймачі (ПЧФ) мають найбільш високу чутливість до зміщення світлового променя. Вони з високою точністю до декількох мікрометрів дозволяють реєструвати переміщення оптичного сигналу робочої поверхні фотоприймача. Це дозволяє застосовувати оптико-електронні ПЧФ в системах прецизійного контролю переміщень і використовувати при малому зміщенні оптичних елементів конструкції, що для вимірювання за допомогою інших фотоприймачів може бути джерелом похибки [3]. Вони незамінні там, де немає можливості використовувати механічні датчики та датчики, засновані на інших принципах.

Основною метою даної роботи є отримання методом порівняння вольт-амперних характеристик та дослідження можливості використання одно та двокоординатних

фотоприймачів на основі з'єднань GaAs (на відміну від CdSe та CdS) в модулях орієнтації штучних метеосупутників Землі.

1. Принципи побудови сучасних позиційно – чутливих фотоприймачів (розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети).

Існують фотоприймачі, за вихідним сигналом, яких визначають координату світлової плями на фоточутливому майданчику приймача. Існують ПЧФ на основі фотодіодів (ФД), фоторезисторів, фототріодів, фототиристорів і т. ін. За кількістю елементів ПЧФ поділяються на одноелементні та багатоелементні. Далі будуть розглядатися переважно багатоелементні фотоприймачі, зважаючи на їх більшу чутливість у порівнянні з одноелементними. Позиційно-чутливі фотоприймачі застосовуються у багатьох галузях науки та техніки. Вони дозволяють визначати положення променя світла або об'єкта, що дає можливість створювати на основі датчиків для вимірювання різних фізичних параметрів. Багатоелементні ПЧФ поділяються на однокоординатні (лінійні) та двокоординатні (матричні) [4].

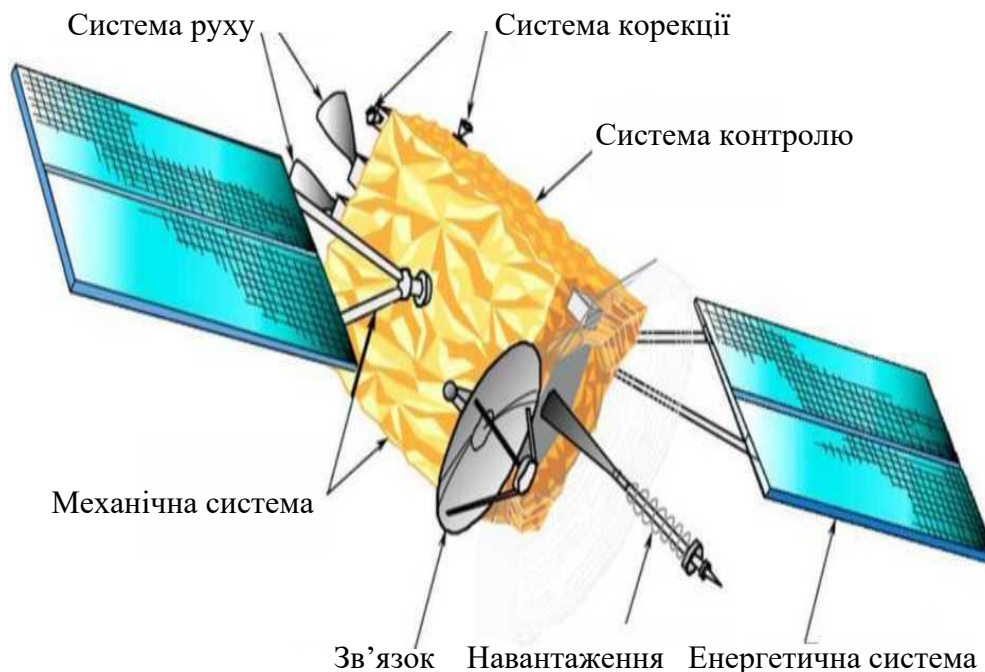


Рисунок 1 – Розміщення вузлів та агрегатів на наносупутнику NOAA (національної метео системи США) морської метео системи

1.1 Однокоординатні позиційно-чутливі фотоприймачі

Однокоординатні ПЧФ застосовують для контролю положення світлового променя в одному напрямку. Вони характеризуються швидкодією, простотою обробки вихідних даних. Широке застосування знайшли фотодіодні ПЧФ, як суцільні, так і лінійки фотодіодів; лінійки приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ):

1.1.1 ПЧФ на основі кремнієвого P-i-N фотодіоду

Крім ПЧФ на p-n-переходах існують кремнієві фотодетектори і на p-i-n-переходах [5].

Величина фотоструму пропорційна відстані між положенням падаючого на поверхню детектора променя і електродами, що знімають напруги. Роздільна здатність положення плями залежить від внутрішніх шумів ПЧФ і від оптичної зашумленості поверхні детектора.

Переваги монолітних напівпровідникових ПЧФП перед дискретними (ПЗЗ-лінійками матрицями або фотодіодними лінійними детекторами) полягають у тому, що [6]:

- можливе забезпечення цифрового, тривалого виміру положення променя, що освітлює поверхню;
- відсутні нечутливі зони, бо немає меж між елементами;
- вони мають високу швидкість імпульсного відгуку;
- мають простішу систему електронної обробки сигналу.

1.1.2 Фотодіодні лінійки

На сучасному ринку напівпровідникових приладів виставлено кілька рядів кремнієвих ФД-лінійок [7]:

Фотодіоди на основі кремнію: OSRAM BP104FS, BP104FASR. Розмір одного з елементів становить $0,9 \times 3$ мм, міжелементний зазор – 0,3 мм. Прилади можуть працювати у фотогальванічному режимі або фотодіодному. Конструкція приладів як друкованої плати.

VISHAY BPV10, BPW20RE. Цей ряд представлений багатоелементними кремнієвими фотодіодами з числом елементів 36 і розміром кожного $0,7 \times 5$ мм з міжелементним зазором 0,1 мм. Довжина лінійки 28,8 мм. Прилад виконаний у вигляді прямокутного корпусу з перпендикулярно розташованим жорсткими висновками; Маса 10 г.

1.1.3 Лінійки ПЗЗ

Спрощено ПЗЗ можна розглядати як матрицю близько розташованих метал-діелектрик-провідник (МДП) – конденсаторів. МДП-структури навчилися отримувати наприкінці 50-х [8]. Були знайдені та розвинені технології, які забезпечували низьку щільність дефектів та домішок у поверхневому шарі напівпровідника. Тим самим вже через 10 років було закладено передумови для винаходу приладів із зарядним зв'язком. У 1970 році були створені перші прилади із зарядовим зв'язком, в яких технологія твердотільних приймачів виявилася особливо успішною. З 1975 року ПЗС почали активно впроваджуватися як телевізійні світлоприймачі. А 1989 року ПЗС-детектори застосовувалися вже майже у 97% усіх телевізійних приймачів. Для порівняння, 10 роками раніше ПЗЗ були представлені лише двома відсотками.

Квантова ефективність сучасних напівпровідникових приймачів випромінювання сягає 95–98%.

Фізичні принципи роботи. З фізичної точки зору ПЗС цікаві тим, що електричний сигнал у них представлений не струмом або напругою, як у більшості інших твердотільних приладах, а зарядом. За відповідної послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДП-конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Тому такі прилади і названі приладами з перенесенням заряду або із зарядним зв'язком [9].

На рис. 2 показана структура одного елемента, лінійного трифазного ПЗЗ у режимі накопичення. Структура складається з шару кремнію р-типу (підкладка), ізолюючого шару двоокису кремнію та набору пластин-електродів. Потенціал одного з електродів більш позитивний, ніж у двох інших, і саме під ним відбувається накопичення заряду. Напівпровідник р-типу отримують додаванням (легуванням) до кристалу кремнію акцепторних домішок, наприклад, атомів бору. Акцепторна домішка створює у кристалі напівпровідника вільні позитивно заряджені носії – дірки. Дірки у напівпровіднику р-типу є основними носіями заряду, вільних електронів там дуже мало. Якщо тепер подати невеликий позитивний потенціал на один із електродів осередку трифазного ПЗЗ, а два інших електроди залишити під нульовим потенціалом щодо підкладки, то під електродом з найбільш позитивним потенціалом утворюється область, збіднена основними носіями – дірками. Вони будуть відтіснені углиб кристала. Мовою енергетичних діаграм це означає, що під електродом формується потенційна яма.

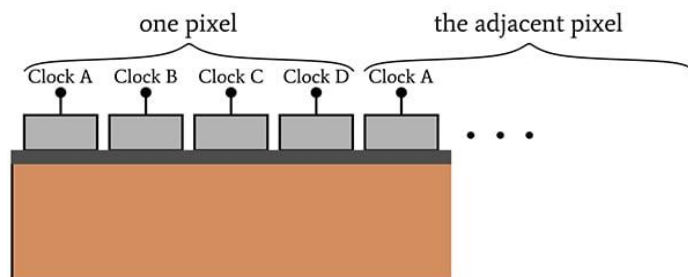


Рисунок 2 – Елемент трифазного ПЗЗ

В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоэффекту, що полягає в тому, що при поглинанні кремнієм фотона, у напівпровіднику генерується пара носіїв заряду – електрон та дірка. Під дією електростатичного поля в області пікселя (one pixel) відбувається "розпад" цієї пари, дірка витісняється в глиб кремнію (clockA-clockD). Неосновні носії заряду, електрони, накопичуватимуться у потенційній ямі під електродом, до якого підведено позитивний потенціал. Тут вони можуть зберігатися досить тривалий час, оскільки дірок у збідненій ділянці немає і електрони не рекомбінують. Носії, згенеровані за межами збідненої області, повільно рухаються – дифундують і, як правило, рекомбінують з гратами, перш ніж потраплять під дію градієнта поля збідненої області.

Носії, згенеровані поблизу збідненої області, можуть дифундувати убік і можуть потрапити під сусідній електрод. У червоному та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають дозвіл гірше, ніж у видимому діапазоні, так як "червоні" фотони проникають глибше в кристал кремнію і розвивається зарядовий пакет. Заряд, накопичений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшено, тоді як потенціал першого електрода буде зменшено (рис. 3). Перенесення в трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямків (ліворуч або праворуч, за малюнками). Всі зарядові пакети лінійки пікселів (pixel1-pixel2) будуть переноситися в один і той самий бік одночасно.

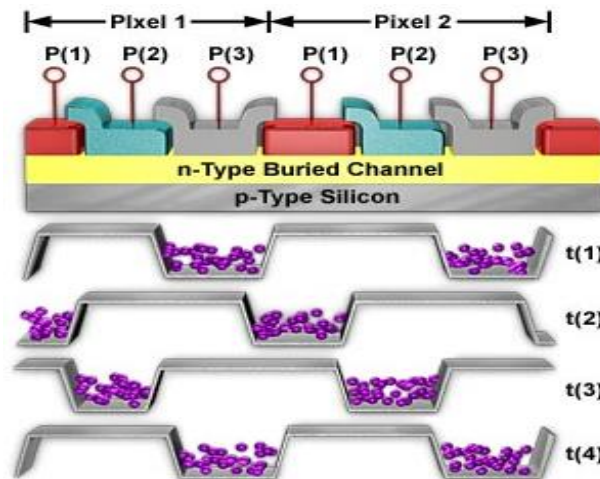


Рисунок 3 – Перенесення зарядів у трифазному ПЗЗ

1.1.4 Дифракційний позиційно-чутливий детектор [10]

Принцип роботи полягає у розкладанні лазерного променя дифракційними гратами на плями діаметром 20 мкм. розмір ПЧФ 3,6×3,0 мм (181×152 ячейки). Визначивши мінімальне та максимальне значення номерів дифракційних плям, з високою точністю, можна обчислити положення центру лазерної плями.

1.1.5 ПЧФ на основі плівок з аномальною фотонапругою [11]

Плівки виготовляються термічним випаром напівпровідникових матеріалів у вакуумі і виходять ступінчастими: товщина змінюється від 1 до 2 мкм.

Такі ПЧФ трансформують світловий потік у три етапи:

- 1) створення фотоструму за рахунок фотогенерації та просторового поділу нерівноважних носіїв на кожному мікро р-п-переході;
- 2) виникнення елементарної напруги на мікро р-п-переходах у результаті накопичення об'ємних зарядів, створюваних фотострумом;
- 3) формування аномально великої фотонапруги шляхом підсумовування елементарних фото-напруг на мікро р-п-переходах.

Падаючий потік при зміщенні генерує фото-напругу, яка змінюється обернено пропорційно зміні товщини плівки від 1 до 2 мкм [12]. Для ПЧФ на основі CdTe-плівки: чутливість 2–5 В/мм при освітленості 10 лк; внутрішній опір 10^{12} – 10^{14} Ом; постійна часу

0,8–1,0; спектральний діапазон 0,5–0,83 мкм; розмір, чутливий майданчик, 2×15 мм; габарити 2×2×20 мм; маса трохи більше 3 г.

1.1.6 Мультискан

Коротко можна відзначити, що принцип роботи полягає в реєстрації напруги, що відповідає координаті медіани інтенсивності випромінювання, що падає на чутливий майданчик ПЧФ.

1.1.7 Аналоги мультискану

З імпортованих аналогів мультискану відомі прилади фірми Hamamatsu C: Модель S3270 (Hamamatsu C). В інституті вугільної промисловості SB RAS та TDI SIE RAS створили прототип багатоканального оптоелектронного вимірника поздовжньої деформації для свердловин [13]. Позиційно-чутливий датчик прикріплюється до породи та може вільно пересуватися вздовж бруса (рис. 4). Позиційний сенсор заснований на електронному фоточутливому пристрої S3270-TIna, виробленому Hamamatsu, з чутливим шаром і електродами. Довжина фоточутливого шару фотоприймача становить 40 мм. При цьому установка, описана в [12], має наступні характеристики: діапазон вимірювань ±17,5 мм; помилка виміру ± 0,02 мм (похибка дорівнює 0,05%).

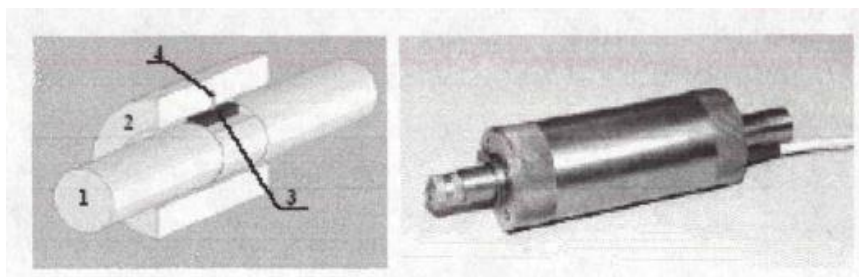


Рисунок 4 – Схема ПЧФ: 1 – вставка, 2 – рухомий вкладиш, 3 – фотодетектор, 4 – LED (ліворуч); позиційний детектор (праворуч)

Рухливий вкладиш 2 монтується на вставку 1 з можливістю поздовжнього переміщення. Поточне положення вкладки по відношенню до вставки визначає положення світлової плями на фотодетекторі. Така конструкція дозволила мінімізувати розмір сенсора, спростити процес монтажу приладу, знизити його масу та проводити вимірювання у всіх напрямках.

Розроблена вимірювальна система забезпечує автоматичний вимір поздовжнього зміщення та деформації, наприклад, у каменях, що використовується у вугільній промисловості.

Автори роботи [14] отримали аналітичний вираз, за допомогою якого показали, що визначення координати в статичному режимі можливе з похибкою 0,03%. А експериментальна перевірка отриманої формули дала значення похибки 0,025%. Обчислювані координати виявилися інваріантними до зміни сумарної потужності падаючого випромінювання.

1.2 Двокоординатні позиційно-чутливі фотоприймачі

1.2.1 Чотирьох елементний фотодіод

Найпростіший багатовіелементний приймач випромінювання – розрізний ФД – є платівкою з р-п-переходом, розділену на 4 частини з проміжком 1–500 мкм. Виготовлені методом фотолітографії чотириелементні ФД дають рівномірну позиційну характеристику і дозволяють зблизити майданчики окремих фотодіодів до 20–50 мкм.

Вихідний сигнал описується виразами (1, 2, 3):

$$V_x = V_{n,x} - V_{m,x} = I_{n,x}R_{n,x} - I_{m,x}R_{m,x}; \quad V_y = V_{n,y} - V_{m,y} = I_{n,y}R_{n,y} - I_{m,y}R_{m,y} \quad (1)$$

де m, n – номери елементів ФД; R – опір, розташований уздовж відповідної осі; x, y – координати центру освітленої зони. Вихідний сигнал залежить від форми плями. Так, для

квадратного перерізу променя, що повністю потрапляє на робочу поверхню ФД, якщо діагоналі квадрата паралельні осям координат, при $R_1 = R_2 = R$;

$$V_x = -2\sqrt{2}RIS_1\Phi \cdot x \quad V_y = -2\sqrt{2}RIS_1\Phi \cdot y \quad (2)$$

де x, y – координати центру світлової плями; R_1 – діаметр плями.

При круглому перерізі променя та тих же додаткових умов:

$$V_x = \frac{4RS_1\Phi}{\sqrt{2\pi}} \left[(x+y)\sqrt{l^2 - 0,5(x+y)^2} + (x-y)\sqrt{l^2 - 0,5(x-y)^2} + \sqrt{2l^2} \left\{ \arcsin \frac{(x+y)\sqrt{2}}{2l} + \arcsin \frac{(x-y)\sqrt{2}}{2l} \right\} \right] \quad (3)$$

Вираз для V_y отримують заміною x на y та y на x . Лінійність сигналу дотримується при $x, y < l$.

1.2.2 Матричний ПЧФ на P-N-переходах

Існує позиційно-чутливий детектор [15], принцип дії якого заснований на реєстрації порівнянні фотострумів з обох боків від світлового променя, що падає на чутливий майданчик. Сам детектор є матрицею з 16 квадратних елементів загальним розміром 2×2 мм і розміром кожного елемента 500×500 мкм. Спектральний діапазон фотоприймача 400–950 нм, пік спектральної чутливості дорівнює 500 мА/Вт і припадає на $\lambda = 800$ нм, час відгуку становить 8 нс. Загальна нелінійність не перевищує 1% по всій поверхні відстаней.

2. Основні результати та їх обговорення. Опис запропонованого ПЧФ та порівняння з ПЧФ CdSe, CdS [16,17]

Усі вище зазначені прилади працювали в умовах ближнього космосу, але мали вихід з ладу або скорочений термін праці. Тому розглядаємо можливість застосування в цих умовах наступних ПЧФ.

Позиційно-чутливі фотоприймачі GaAs створюються як з урахуванням поздовжнього (ефект Уолмарка), і поперечного фотоелектрив. Схеми ПЧФ з поздовжнім (а) та поперечним (б) фотоелектом зображені на рис. 5 (а, б).

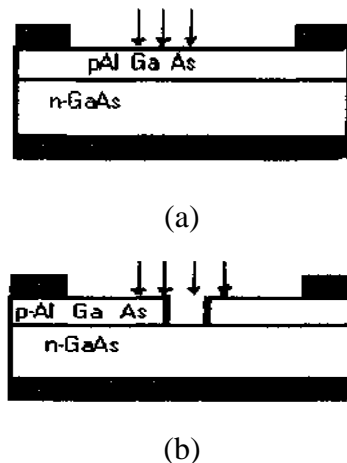


Рисунок 5 – Схеми ПЧФ з поздовжнім (а) та поперечним (б) фотоелектом

ПЧФ є підкладкою з n-GaAs. На поверхні підкладки методом рідинної епітаксії з обмеженого розчину-розплаву вирощений епітаксійний шар p-Al_{0,7}Ga_{0,3}As. З метою створення надійного омичного контакту до твердого широкозонного розчину, на його поверхні вирощений шар p-GaAs. Методами фотолітографії та селективного травлення p-GaAs видаляється зі світлочутливої поверхні. На p-GaAs осаджуються лінійчасті контакти, але в n-область – суцільний контакт.

Розмір вихідного сигналу між контактами до p-області лінійно залежить від координати центру світлової плями. Використання гетеропереходів у широкозонних напівпровідниках дозволяє з одного боку зменшити j_s до значень $\sim 10^{13}$ А/см², що разом з можливістю управління питомим опором твердого розчину Al_xGa_{1-x}As дозволяє отримувати

у поздовжніх фотоелементах високе значення крутизни лінійності позиційної характеристики (ПХ), а з іншого боку, значно розширити діапазон робочих температур ПЧФ у порівнянні з наявними закордонними аналогами (наприклад, датчиком положення S1352 фірми Hamamatsu). Змінюючи концентрацію x твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$, що є, по суті, широкозонним вікном для світла, можна ефективно керувати шириною спектрального діапазону ПЧФ. На рис. 6 приведена конструкція лабораторного стенду.



Рисунок 6 – Лабораторний стенд

Технічні характеристики:

Лінійність позиційної характеристики (%).....	0,1
Діапазон робочих температур (°C).....	-200+400
Спектральний діапазон (мкм).....	0,6-0,86
Розміри корпусу датчика (мм).....	10×14×20
Точність позиціонування (мкм).....	5

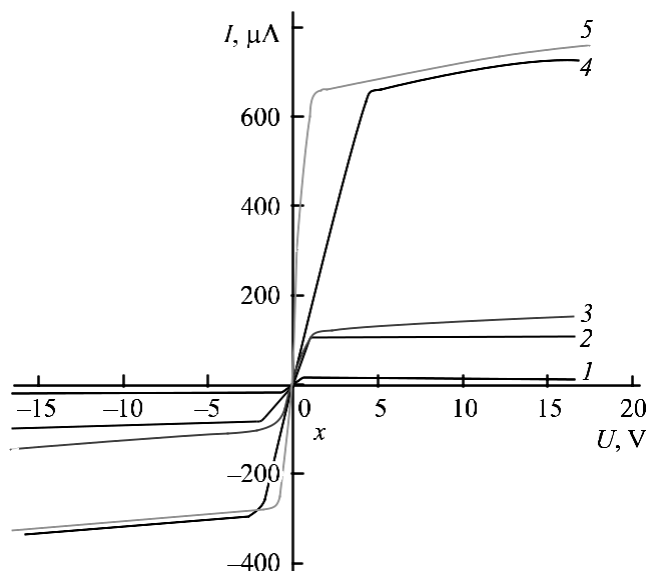


Рисунок 7 – Вольт-амперні характеристики ПЧФ кут зміщення 1° ;
(1- n-CdS; 2, 3 -n- CdSe; 4,5-n-GaAs)

Фотоприймач змонтований на мідному компенсаторі, припаяному до металізованої діелектричної пластини, і розміщений у циліндричному корпусі з поворотним механізмом, на валу якого розміщений діелектричний диск з лазерним ІЧ-діодом. ІЧ-діод зафіксований щодо фотоприймача. Максимальний кут ІЧ-діода щодо контакту ПЧФ становив 1° .

Експериментально досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) ПЧФ: 1- n-CdS; 2,3- n-CdSe; 4,5- n-GaAs, (рис.7). При цьому ІЧ-лазерний діод випромінював на довжині хвилі 780 нм. Струм накачування лазера дорівнює 100 mA, діаметр променя на поверхні ПЧФ становив 1 mm. Довжина світлочутливої області фотоприймача становила $L = 14,0$ мм. Темновий струм становив 2 А і відношення фотоструму до темного струму $I_{ph}/I_d \sim 1000$. Живлення ПЧФ здійснювалося від високостабільного блоку живлення. Вимірювання проводились вольтметром В7–40А. Погрішність виміру становила 0,5%. Напруга живлення між електродами ПЧФ становило $U_{12} = 24V$. ВАХ ПЧФ отримані при подачі напруги між контактами (рис. 5, 6) і вимірювання струму, що протікає через два зустрічно-последовні р-п-переходи. З рис. 7 видно, що при освітленні фоточутливої області ПЧФ ВАХ залишається практично незмінною, тобто фотострум у структурі не залежить від координати світлової плями. Але система n- GaAs має найліпші показники.

Таким чином, результати роботи показують можливість створення позиційно-чутливого фотоперетворювача кута повороту на основі напівпровідникових позиційно-чутливих фотоприймачів. Такі перетворювачі мають лінійну залежність вихідного сигналу від кута, високу точність визначення кута (у розробленій конструкції, за розрахунком – $0,7^0$), високу надійність (твердотільна конструкція), а також сумісність з будь-якою вимірювальною, погоджувальною та обробною апаратурою. При цьому, як джерело випромінювання може бути використаний напівпровідниковий лазер (лазерний діод), промінь якого проектується на поверхню фотоприймача, у тому числі за допомогою оптичних волокон.

Висновок. У цій роботі було досліджено однокоординатні та двокоординатні фотоприймальні пристрої. Основними вимогами до таких датчиків є висока чутливість, точність, компактність та економічність. Оптико-електронні фотоприймальні пристрої на базі- n-GaAs мають найвищу чутливість до зміщення світлового променя. Вони з високою точністю до декількох мікрометрів дозволяють реєструвати переміщення оптичного сигналу робочої поверхні фотоприймача. Це дозволяє застосовувати оптико-електронні фотоприймальні пристрої, на базі сполук n-GaAs, у системах прецизійного контролю переміщень та використовувати при малому зміщенні оптичних елементів конструкції. Відіокони в данному випадку більш захищені від коронарних викидів Сонця.

Для цього дослідження було створено стенд для проведення калібрувальних випробувань, до складу якого входять поворотна платформа та імітатор Сонця, а також розроблено програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень у автоматичному режимі. Основною вибрано модель вимірювань датчика на основі геометричних співвідношень та на основі поліноміальної залежності напружання на Сонце від координат сонячної плями на кристалі.

У роботі експериментально вивчено вольт-амперні характеристики ПЧФ, виготовлених на основі епітаксійних шарів – n-GaAs. Проведено теоретичний аналіз позиційної чутливості фотоприймачів n-GaAs на основі елементарної теорії токопротікання. Встановлено, що характеристики координатної чутливості ПЧФ – n-GaAs корелюють з експериментальними залежностями за формою кривих та становищем максимумів. Визначено питому спектральну чутливість фотоприймача – n-GaAs. За рівних умов збудження вона в 12 разів перевищує чутливість ПЧФ, виготовлених на основі n-CdS, та 10 разів перевищує чутливість ПЧФ, виготовлених на основі n-CdSe [16, 17], що свідчить про безперечну перспективність ПЧФ на основі шарів арсеніду галію. Про перспективність шарів n-GaAs свідчить і висока питома координатна чутливість, що важливо для виявлення можливостей використання ПЧФ n-GaAs у штучних космічних супутниках Землі.

Перспективи подальших досліджень.

Наступним етапом цієї роботи є комплексне дослідження сонячного датчика на основі сполук АЗВ5. Для цього дослідження було створено стенд для проведення калібрувальних випробувань, до складу якого входять поворотна платформа, а також розроблено програмне забезпечення для проведення натурних експериментів у автоматичному режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. GOES-R Series website: <https://www.goes-r.gov/users/GOES-17-ABI-Performance>; 2022.
2. Чіковані В. В. Волоконно-оптичний гіроскоп в порівнянні з коріолісови вібраційним гіроскопом. Військово-технічний збірник, (10), 2014. с 78–82.
3. Богатирьова В. В. Оптичні виміри в неінерційних системах відліку // Науково-технічний вісник СПБГУІТМО, 2010. Т. 65. №1.
4. Angelsky O. V., Maksymyak P. P., Zenkova S. Y., Maksymyak A. P., Hanson S. G., Ivanskyi D. D., “Peculiarities of control of erythrocytes moving in an evanescent field”, (2019) Journal of Biomedical Optics, 24 (5), 055002.
5. Нурдінова Р. А. Інтернет-науковий форум молодих вчених, докторантів та дослідників. Дослідження позиційно-чутливих датчиків для визначення положень об'єктів, 2023. – С. 84–85. ТАТУФФ-ЕРАІ.
6. Спосіб обробки поверхні монокристалу кремнію Патент на винахід. 3412 Україна МПК7H01L21/00/Крапивко Г. І.; заявник і патентовласник Херсонський державний технічний університет. № 2004021333; заявл. 24.02.04 ; опубл. 15.11.04, Бюл. № 11.
7. Development of diode temperature sensors with operating range up to 750 K. Hennadiy Kravnyk Oleksii Demenskyi Vol 3, №5(93). – 2018. – P.19–26 // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (SciVerse Scopus).
8. Бірюков Е. Еволюція датчиків зображення: від ПЗЗ до КМОП // Компоненти та технології, 2007. № 10 С. 56–59.
9. Вимірювальні перетворювачі систем оптичної діагностики з багато функціональними фотоприймачами / Р. І. Воробей, О. Гусев, А. І. Свистун, А. К. Тявловський, К. Л. Тявловський, Л. І. Шадурська // Прилади та методи вимірювань, 2018. № 3. – С. 215–226.
10. Andrés Márquez, Francisco J. Martínez-Guardiola, Jorge Francés, Cristian Neipp, Manuel G. Ramírez, Eva M. Calzado, Marta Morales-Vidal, Sergi Gallego, Augusto Beléndez, Inmaculada Pascual, “Analytical modeling of blazed gratings on two-dimensional pixelated liquid crystal on silicon devices,” Optical engineering 59(4), 041208(2020).
11. Методичні вказівки щодо самостійної роботи студентів з дисципліни “Компоненти мікро та нанотехніки” для студентів спеціальності 176 «Мікро та наносистемна техніка». / Уклад.: Паламар М. І., М. О. Стрембіцький. – Тернопіль: ТНТУ 2023 – 12 с.
12. Патент РФ № 2246779, МПК H01L31/09, "Координатно-чутливий приймач оптичного випромінювання" Рахімов Н. Р., Серйознов О. М., пріоритет від 03.11.2003, опубліковано 20.02.2005.
13. Chugui Yu. V., Verkhogliad A. G., Potashnikov A. K., Finogenov L. V., Makarov S. N. Optical-electronic measuring systems for scientific and industrial applications // ОМПІ, 2007. С. 26–38.
14. Нурдінова Р. А., Алімжонова А. Ш. Нові аспекти застосування елементів аномальними фотовольтаїчними напругами, Науково-технічний журнал «Фізика напівпровідників та мікроелектроніка», ISSN: 2181-9947, DOI 10.37681/2181-9947-2019-4, С. 49–55.
15. Photonics Rules of Thumb, Third Edition Author(s): John Lester Miller; Edward J. Friedman; John N. Sanders-Reed; Katie Schwertz; Brian K. McComas SPIE PRESS BOOK 2020 P. 740.
16. Чукіта В. І., Сенокосов Е. А., Феценко В. С. Стенд для дослідження позиційно-чутливого фотоприймача // Технологічний журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 69–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76.
17. Використання квантових точок на основі CdSe/CdS/ZnS в компланарних ємнісних структурах для оптичних датчиків газових середовищ С. А. Павлов, А. С. Павлов, Є. Ю. Максимова, А. В. Алексеєнко, А. В. Павлов, Є. М. Антипов // Прикладна фізика, 2018. №3 С. 27–33.

REFERENCES

1. GOES-R Series website: (2022). <https://www.goes-r.gov/users/GOES-17-ABI-Performance>.
2. Chikovani, V. V. (2014). A fiber-optic gyroscope compared to a Coriolis vibration gyroscope. *Military and technical collection*, (10). P.78–82.
3. Bogatyreva, V. V. (2010). Optical measurements in non-inertial frames of reference // *Scientific and technical bulletin of SPbGUITMO*. Vol. 65. No. 1.
4. Angelsky, O. V., Maksymyak, P. P., Zenkova, C. Y., Maksymyak, A. P., Hanson, S. G., Ivanskyi, D. D. (2019). “Peculiarities of control of erythrocytes moving in an evanescent field”, *Journal of Biomedical Optics*, 24 (5), 055002.
5. Nurdinova, R. A. Online scientific forum of young scientists, doctoral students and researchers. Research of position-sensitive sensors for determining the positions of objects, 2023. – P. 84–85. TATUFF-EPAI.
6. The method of processing the surface of a silicon single crystal Patent for the invention. (2004). 3412 Ukraine MPK7H01L21/00 / G. I. Krapyvko; applicant and patent owner Kherson State Technical University. No. 2004021333; statement 24.02.04; published 15.11.04, Bul. No. 11.
7. Development of diode temperature sensors with operating range up to 750 (2018). K. Hennadiy Krapyvko Oleksii Demenskyi Vol 3, №5(93). – P. 19–26 // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (SciVerseScopus)*.
8. Biryukov, E. (2007). Evolution of image sensors: from CCD to CMOS // *Components and Technologies*. No. 10 P. 56–59.
9. Measuring converters of optical diagnostic systems with multifunctional photodetectors / R. I. Vorobey, O. K. Gusev, A. I. Svistun, A. K. Tyavlovsky, K. L. Tyavlovsky, L. I. Shadurskaya // *Instruments and measurement methods*, 2018. No. 3. – P. 215–226.
10. Andrés Márquez, Francisco J. Martínez-Guardiola, Jorge Francés, Cristian Neipp, Manuel G. Ramírez, Eva M. Calzado, Marta Morales-Vidal, Sergi Gallego, Augusto Beléndez, Inmaculada Pascual, (2020). “Analytical modeling of blazed gratings on two -dimensional pixelated liquid crystal on silicon devices,” *Optical engineering* 59(4),041208, doi: 10.1117/1.OE.59.4.041208.
11. Methodological guidelines for independent work of students from the discipline "Micro- and nanotechnology components" for students of specialty 176 "Micro- and nanosystem technology". / Compiler: M. I. Palamar, M. O. Strembitskyi. – Ternopil: TNTU 2023 – 12 p.
12. Patent of the Russian Federation No. 2246779, IPC H01L31/09, "Coordinate-sensitive receiver of optical radiation" Rakhimov N. R., Seryoznov O. M., priority from 03.11.2003, published 20.02.2005.
13. Chugui, Yu. V., Verkhogliad, A. G., Potashnikov, A. K., Finogenov, L. V., Makarov, S. N. (2007). Optical-electronic measuring systems for scientific and industrial applications // *OMIP*. P. 26–38.
14. Nurdinova, R. A., Alimzhonova, A. Sh. New aspects of the use of elements with anomalous photovoltaic voltages, *Scientific and technical journal "Physics of semiconductors and microelectronics"*, ISSN: 2181-9947, DOI 10.37681/2181-9947-2019-4, P.49–55.
15. *Photonics Rules of Thumb, Third Edition* Author(s): John Lester Miller; (2020). Edward J. Friedman; John N. Sanders-Reed; Katie Schwertz; Brian K. McComas SPIE PRESS BOOK P. 740.
16. Chukita, V. I., Senokosov, E. A., Feshchenko, V. S. (2019). The stand for research of positional-sensitive photosensor// *Technological Journal*; 7(3) P.69–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76.
17. The use of quantum dots based on CdSe (2018). / CdS / ZnS in coplanar capacitive structures for optical sensors gas environments S. A. Pavlov, A. S. Pavlov, E. Yu. Maksimova, A. V. Alekseenko, A. V. Pavlov, and E. M. Antipov // *Applied physics*, No.3. P. 27–33.

Крапивко Г. І. EXPEDIENCY OF USING GaAs COMPOUNDS IN ORIENTATION MODULES OF ORBITAL METEOROLOGICAL SATELLITE

A lot of time has passed since the beginning of satellite meteorological studies of weather phenomena on the Earth's surface. The recording systems, data transfer rates, image quality of cyclones, etc. have changed. However, the main problem has not been solved yet: "how to cool the videocon on the shadow side of the Earth, when light quanta directly fall into the focus of the lens.

The topic of this work is the study of the comparative characteristics method of the possibility of using one- and two-coordinate photodetectors based on GaAs compounds (as opposed to CdSe and CdS) in the orientation modules of artificial weather satellites of the Earth in order to prevent the failure of the photo recorder.

The volt-ampere characteristics (VAH) of PCFs were experimentally investigated: n-CdS; n-CdSe; n-GaAs. At the same time, the IR laser diode emitted at a wavelength of 780 nm. The pump current of the laser is equal to 100 mA, the diameter of the beam on the surface of the PCF was 1 mm. The length of the light-sensitive region of the photoreceptor was $L = 14.0$ mm. The dark current was 2A and the ratio of photocurrent to dark current $I_{ph}/I_d \sim 1000$. The power supply of the PFC was carried out from a highly stable power supply unit. Measurements were made with a B7-40A voltmeter. The measurement error was 0.5%. The supply voltage between the electrodes of the PCB was $U_{12} = 24V$. The VAH of the PFC was obtained by applying voltage between the contacts and measuring the current flowing through two counter-series p-n junctions. When the photosensitive area is illuminated, the power factor of the PFC remains practically unchanged, that is, the photocurrent in the structure does not depend on the coordinate of the light spot. But the n-GaAs system has the best performance.

It was established that the characteristics of the coordinate sensitivity of the PCF - n-GaAs correlate with the experimental dependences on the shape of the curves and the position of the maxima. The specific spectral sensitivity of the n-GaAs photodetector was determined. Under equal excitation conditions, it is 12 times higher than the sensitivity of PCFs made on the basis of n-CdS, and 10 times higher than the sensitivity of PCFs made on the basis of n-CdSe, which indicates the indisputable promise of PCF based on gallium arsenide layers. The promising nature of n-GaAs layers is also evidenced by the high specific coordinate sensitivity as well as the operating temperature limit $-200+400^{\circ}C$, which is important for identifying the possibilities of using n-GaAs PCFs in artificial space satellites of the Earth.

Key words: satellite meteorological systems; GaAs; position-sensitive photoreceptors; orientation.

© Крапивко Г. І.

Статтю прийнято
до редакції 13.11.2023

ДОСТУПНІСТЬ ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ З ОГЛЯДУ ФОРМУВАННЯ ТАРИФУ

Луб'яний П. В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: lubravel@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2668-5063;

Войтович О. А., к.т.н., доцент, декан факультету інженерії та транспорту Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: olgavoitovich@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0510-4362;

Кузьменко І. О., аспірант кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: igor.kuuzmenko@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6878-7310.

Відставання розвитку пасажирського транспорту від потреб населення у пересуваннях викликає соціально-економічні проблеми та негативно позначається на роботі інших галузей економіки міста. Робота громадського транспорту є важливим показником якості життя у місті та одним із критеріїв оцінки діяльності місцевої влади. При організації пасажирських перевезень потрібне проведення грамотної цінової політики, оскільки від неї залежить фінансова стабільність підприємств транспорту. Для значної частини населення транспортні витрати займають вагомую частку у загальних споживчих витратах. Пасажирські перевезення впливають на транспортну доступність регіонів, рівень транспортної рухливості населення і добробуту громадян – мають велику соціальну значимість. З точки зору економічної доцільності пасажирські перевезення необхідно організувати таким чином, щоб забезпечити населення необхідними комунікаціями, при цьому мають бути ефективно використані енергетичні, фінансові та інші ресурси за необхідного рівня якісного обслуговування. Яскраво виражений соціально-значущий характер роботи громадського пасажирського транспорту має підкріплюватися у гарантованості високої якості перевезень найменш забезпеченим категоріям пасажирів. У роботі запропонована економіко-математична модель для формування тарифу на пасажирські перевезення з урахуванням належного рівня якості та соціально-економічного розвитку регіону.

Ключові слова: тариф; пасажирські перевезення; заробітна плата; графік; комфортність; пасажирський транспорт; прибутковість перевезень; якість перевезень.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.107–118

Вступ. Зі збільшенням добробуту населення збільшуються його потреби, зокрема, пов'язані з процесом переміщення на автотранспорті загального користування. Такими потребами є [1, 2]:

- сумарні витрати часу на пересування;
- регулярність руху рухомого складу;
- кількість пересадок;
- безпека поїздки;
- вартість переміщення;
- доступність транспорту;
- наповнення рухомого складу;
- комфортність пересування;
- естетичне та етичне обслуговування пасажирів;
- провізна спроможність транспорту;
- час очікування транспортного засобу у пунктах зупинки;
- екологічні потреби тощо.

Сукупність перелічених показників прийнято називати якістю пасажирського сервісу. Для підвищення якості необхідно [3]:

- постійне оновлення парку низькопідлоговими транспортними засобами;
- використання транспортних засобів необхідної місткості, відповідної попиту перевезення на кожному маршруті;
- підвищення культури обслуговування тощо.

Для цього необхідне додаткове фінансування, наприклад, обов'язковий розподіл частини прибутку підприємства, як це прийнято за кордоном [4–8].

Необхідно також зазначити, що регулювання якості перевезень здійснює організатор транспортного обслуговування населення – Управління транспорту і зв'язку миськвиконкому, виходячи із стратегії розвитку підвідомчої території. Іншими словами, якщо стратегією передбачено забезпечення населення доступним транспортом загального користування, вартість проїзду регулюється до мінімального рівня [9].

Йдеться про вартість проїзду як категорію, що дозволяє оцінити величину забезпечення якості перевезень. Задоволення потреби населення в перевезеннях з тією якістю, яка пред'являється як нормативна, не кажучи вже про його підвищення, при тарифах, що обчислюються за сучасною методикою, є малоімовірним для ста відсотків перевізників [10]. Така позиція обґрунтована результатами аналізу діяльності перевізників різної форми власності, що здійснює миські та примиські перевезення, а також перевезення пільгових категорій громадян.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми розвитку та якості роботи транспортної галузі розглядалися багатьма відомими вітчизняними та зарубіжними науковцями. Найбільш відомими є праці: П. Горбачова, Д. Понкратова, В. Долі, Є. Нагорного, В. Вдовиченко, Ю. Давидича, О. Амоша, О. Філіппова, О. Бакаєва, Б. Бейліса, М. Бідняка, Н. Бондар, О. Васильєва, А. Воркут, В. Гаги, Д. Горового, З. Герасимчук, В. Кальченка, В. Козлової, О. Котлубая, П. Макела, Ю. Кулаєва, Ю. Кутах, В. Кушліна, В. Красовського, Дж. Лі, І. Малярчука, К. Михайліченко, А. Новікової, Т. Нотебума, Ю. Пащенко, С. Пирожкова, К. Плужнікова, Д. Прейгера, В. Ревенка, А. Рибчука, Н. Рудь, П. Розенштейн-Родана, І. Садловської, П. Самуельсона, Л. Сотниченко, Дж. Стиглиця, В. Федька, Г. Филюк, Я. Шевчука, В. Штанів та інших.

Тарифна політика держави є одним з найважливіших інструментів впливу на хід економічних і соціальних процесів у країні. Вона складає частину державної цінової політики і має реалізувати загальноекономічну тенденцію переходу до системи вільного ціноутворення [11].

Наприклад, для перевізника, результати економічної діяльності якого показують перевищення витрат над доходами, очевидно, що йдеться не про підвищення якості послуг, а про виживання. Звісно, причини такого становища можуть бути різні – від невідповідної даного поселення структури парку до неефективної організації транспортного обслуговування населення. Кожна з причин, своєю мірою, впливає на рентабельність найбільшого підприємства міста, проте вирішення цієї проблеми, без зміни парку та зміни маршрутної мережі проявляється у правильному регулюванні тарифів, за допомогою вдосконалення методики їх розрахунку.

Чинна методика передбачає розрахунковий рівень тарифу шляхом поділу величини необхідного валового виторгу (економічно обґрунтованих витрат перевізника та необхідного прибутку) на плановий обсяг регульованих послуг [12].

Таким чином, попри наявність чисельних науково-практичних розробок, можна говорити про недостатню увагу до проблем забезпечення економічної безпеки України у сфері транспорту, у тому числі в частині розвитку транспортної інфраструктури. Зокрема, недостатньо дослідженим науковцями є взаємозв'язок між розвитком транспортної інфраструктури та економікою держави, не сформованими є концепція, категорійний базис, методологічні засади та пріоритети державного регулювання економікою в сфері транспорту з урахуванням вимог економічної безпеки держави та, зокрема, при реалізації важливої функції державного регулювання – управління розвитком транспортної інфраструктури [13].

Постановка проблеми у загальному вигляді. Аналіз показав, що існуюча методика розрахунку тарифів на перевезення пасажирів не дозволяє перевізникам надавати якісні послуги. З огляду на це, є потреба у розробленні методики розрахунку тарифів, яка враховує якість пасажирського сервісу та соціально-економічного розвитку регіону.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення економіко-математичної моделі тарифоутворення на пасажирські перевезення з урахуванням належного рівня якості та соціально-економічного розвитку регіону.

Методи дослідження. Аналіз діяльності перевізників проводився за показниками доходності та витратності послуг перевезення пасажирів автотранспортом загального користування з урахуванням показників якості пасажирського сервісу та соціально-економічного розвитку регіону.

Виклад основного матеріалу. Між тарифами та попитом на перевезення є явно виражена зворотна залежність: чим вищий тариф даного виду транспорту, тим нижчим буде попит на його послуги. Однією з причин цього явища є зростання конкуренції над ринком пасажирських перевезень, оскільки у багатьох містах і населених пунктах успішно функціонують транспортні компанії недержавної власності, здійснюють маршрутизовані перевезення пасажирів мікроавтобусами на маршрутах, паралельних маршрутам міського транспорту. Інтереси пасажирів та перевізників у сфері міських пасажирських перевезень не збігаються. Перевізник зацікавлений у отриманні виручки, зокрема і за рахунок збільшення коефіцієнта змінності. Пасажир хоче прибути до місця призначення швидко, без пересадок і за мінімальний тариф. Для значної частини населення транспортні витрати займають вагомий частку у загальних споживчих витратах. Вартість перевезень у пасажирському сполученні обмежує можливості для поїздок населення, а в багатьох випадках для частини населення з невисокими доходами робить ці поїздки недоступними. Зниження рівня тарифу пасажирських перевезень має як соціальне, так й економічне значення. Здешевлення перевезень дозволяє підвищити якість життя населення та рівень ділової активності, створює більш сприятливі умови для реалізації потенційних економічних та соціальних можливостей [14]. Щоб послуги міського пасажирського транспорту були доступні для більшої частини населення, величина тарифу на пасажирські перевезення, встановлена органами влади, не повинна бути вищою за максимальний тариф. Максимальний тариф знаходиться за формулою (1).

$$T_{\max} = (ЗП_{\text{ср.міс}} \cdot V_{\text{с}}) / K_n \quad (1)$$

де T_{\max} – максимальний тариф на пасажирські перевезення, грн;
 $ЗП_{\text{ср.міс}}$ – середньомісячна заробітна плата жителів міста, грн;
 $V_{\text{с}}$ – рівень витрат населення послуги міського пасажирського транспорту, %;
 K_n – середня кількість поїздок на місяць.

При знаходженні максимального можливого тарифу використовувався алгоритм, заснований на платоспроможному попиті населення, але у запропонованій залежності додатково запроваджено показник «середньомісячна номінальна нарахована заробітна плата», тоді методику розрахунку максимального тарифу на пасажирські перевезення можна застосовувати без труднощів у багатьох утвореннях.

У формулі (1) використовується показник середньомісячної заробітної плати жителів міста, розраховано рівень транспортних витрат для населення у відсотках від середньомісячної заробітної плати, величини прожиткового мінімуму на душу населення за 5 років. У роботі використані дані зібрані вченими кафедри транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету у довоєнний час. Проведений аналіз показує, що з підвищенням середньомісячної заробітної плати рівень щомісячних витрат на транспорт має чітко виражену динаміку зростання.

Розглядаючи процес встановлення тарифу на пасажирські перевезення, необхідно виходити із пошуку компромісу між трьома сторонами: перевізниками, органами місцевого самоврядування, пасажирями. Ефективність перевезень для кожної із сторін також оцінюватиметься по-різному. Для перевізників ефективність оцінюється прибутковістю та рентабельністю. З погляду органів місцевого самоврядування ефективність розуміється як задоволення транспортних потреб населення за мінімальних витрат міського бюджету та дотримання вимог безпеки. Для пасажирів ефективність міських пасажирських перевезень

визначається надійністю обслуговування, комфортом поїздки та доступністю тарифу.

Мінімальний тариф на пасажирські перевезення визначається на основі економічної доцільності та державної дотації витрат, пов'язаних із перевезенням пільгових пасажирів. У розрахунку мінімального тарифу на пасажирські перевезення враховується надбавка на страхування життя, здоров'я та майна пасажирів. Мінімальний тариф при цьому розраховується за формулою (2).

$$T_{\min} = \frac{3 + P_p - P_d + J}{Q}, \quad (2)$$

де T_{\min} – мінімальний рівень тарифу на пасажирські перевезення, грн;
 3 – прогнозні витрати на перевезення пасажирів, грн;
 P_p – запланований прибуток, грн;
 P_d – обсяг дотації перевезення пільгових категорій пасажирів, грн;
 J – страхова надбавка на страхування життя, здоров'я та майна пасажирів, грн;
 Q – обсяг перевезень, пас.

Тариф на пасажирські перевезення, нижчий за мінімальний, не забезпечить підприємство необхідними доходами для здійснення його діяльності з перевезення пасажирів.

Встановлення тарифу на міські пасажирські перевезення не нижчий мінімального та не більший максимального тарифу, забезпечуватиме прийнятний рівень комфорту, відповідну якість надання послуг та нормальне функціонування міського пасажирського транспорту.

Запропонований коефіцієнт якості стосовно сучасної системи тарифоутворення враховує внутрішні чинники, що залежать від підприємств міського пасажирського транспорту, та оціночні параметри рівня обслуговування.

Для підвищення якості обслуговування пасажирів необхідно при розрахунку тарифу на перевезення враховувати показники якості. У результаті аналізу було обрано основні показники якості перевезень пасажирів. Такий показник якості, як щільність маршрутної мережі, впливає на рівень тарифу, оскільки рівень розвитку маршрутної системи визначає можливість здійснення безпересадкових поїздок у системі міського пасажирського транспорту. Проведений аналіз дозволив виявити, що на величину щільності маршрутної мережі впливає містобудівна політика, що є зовнішнім фактором, який не залежить від підприємств пасажирського транспорту. Витрати на інформаційне обслуговування можуть швидко окупатися, наприклад, за рахунок залучення сторонніх організацій для розміщення реклами на інформаційному табло. Тому цей показник можна не враховувати під час розрахунку тарифу на пасажирські перевезення. Основними показниками рівня обслуговування пасажирів на міському транспорті є коефіцієнт використання місткості рухомого складу та коефіцієнт регулярності. Наголошується, що такий показник якості перевезень пасажирів, як час на поїздки, можна не включати до розрахунку тарифу на пасажирські перевезення, оскільки він залежить від таких зовнішніх факторів, як ситуація на дорозі, дорожні умови, кваліфікація водія тощо.

Для того, щоб оцінювати та контролювати, регулювати роботу підприємств пасажирського транспорту за якістю обслуговування пасажирів, необхідно запровадити такий показник, як коефіцієнт якості, до розрахунку тарифу на пасажирські перевезення. Коефіцієнт якості ($K_{ко}$) визначається за співвідношенням (3).

$$K_{ко} = \frac{\gamma_n}{\gamma_\phi} \cdot K_{рег}, \quad (3)$$

де γ_n – нормативний коефіцієнт використання місткості рухомого складу;
 γ_ϕ – фактичне значення коефіцієнта використання місткості автобуса;
 $K_{рег}$ – коефіцієнт регулярності руху на маршрутах.

У формулі (3) для розрахунку коефіцієнта якості використовується час, затрачаний пасажиром на поїздку. Даний показник не враховується при знаходженні коефіцієнта якості, оскільки залежить переважно від зовнішніх чинників, які не залежать від автотранспортного підприємства. У зв'язку з цим було розраховано оціночні параметри рівня обслуговування (табл. 1).

Таблиця 1 – Оціночні параметри рівня обслуговування [13]

Рівень обслуговування	Оціночні параметри		
	γ_n / γ_ϕ	$K_{рег}$	$K_{ко}$
Зразковий	1,0 і вище	0,95	0,95 і вище
Гарний	0,88–0,99	0,93–0,94	0,82–0,93
Задовільний	0,75–0,87	0,92	0,69–0,80
Незадовільний	Нижче 0,75	Нижче 0,92	Нижче 0,69

Тариф на пасажирські перевезення значною мірою залежить від коефіцієнта якості, обсягу перевезень та фактичної кількості рейсів. У дослідженні оцінка роботи рухомого складу на маршруті здійснюється на підставі змінно-добового плану перевезень, тому важливим завданням оптимізації тарифу на міські пасажирські перевезення є визначення такої кількості рейсів, за якої буде досягнуто величину тарифу на пасажирські перевезення, що не перевищує величину встановленого органами місцевого самоврядування тарифу.

При цьому рівень якості перевезень повинен бути на відповідному рівні (коефіцієнт якості повинен бути не нижче за задовільний рівень).

Економіко-математична модель для формування тарифу на пасажирські перевезення з урахуванням належного рівня якості (не нижче за задовільний) у системі міського пасажирського транспорту представлена у вигляді блок-схеми на рисунку 1.

Формулу розрахунку тарифу на пасажирські перевезення з урахуванням якості представимо вигляді (4).

$$T_k = \frac{C_p \cdot N_\phi \cdot (1 + R)}{Q} \cdot K_{ко}, \quad (4)$$

де T_k – тариф на пасажирські перевезення з урахуванням якості, грн;
 C_p – середня собівартість пасажирських перевезень за рейс, грн;
 N_ϕ – фактична кількість рейсів, од.;
 R – рентабельність, %;
 Q – фактичний обсяг перевезень, пас.;
 $K_{ко}$ – коефіцієнт якості.

З погляду органів місцевого самоврядування оптимальним буде такий тариф на пасажирські перевезення, за якого надаватимуться транспортні послуги прийнятної якості (за місткістю рухомого складу та регулярністю руху) з мінімальними виплатами з місцевого бюджету. Для споживачів послуг міського пасажирського транспорту оптимальним буде такий тариф, за якого перевезення буде виконано чітко за графіком, з максимальною комфортністю та з мінімальними витратами (при цьому тариф має бути доступним для основної маси населення). З погляду транспортних підприємств оптимальним є такий тариф на пасажирські перевезення, при якому витрати на перевезення прагнуть до мінімуму.

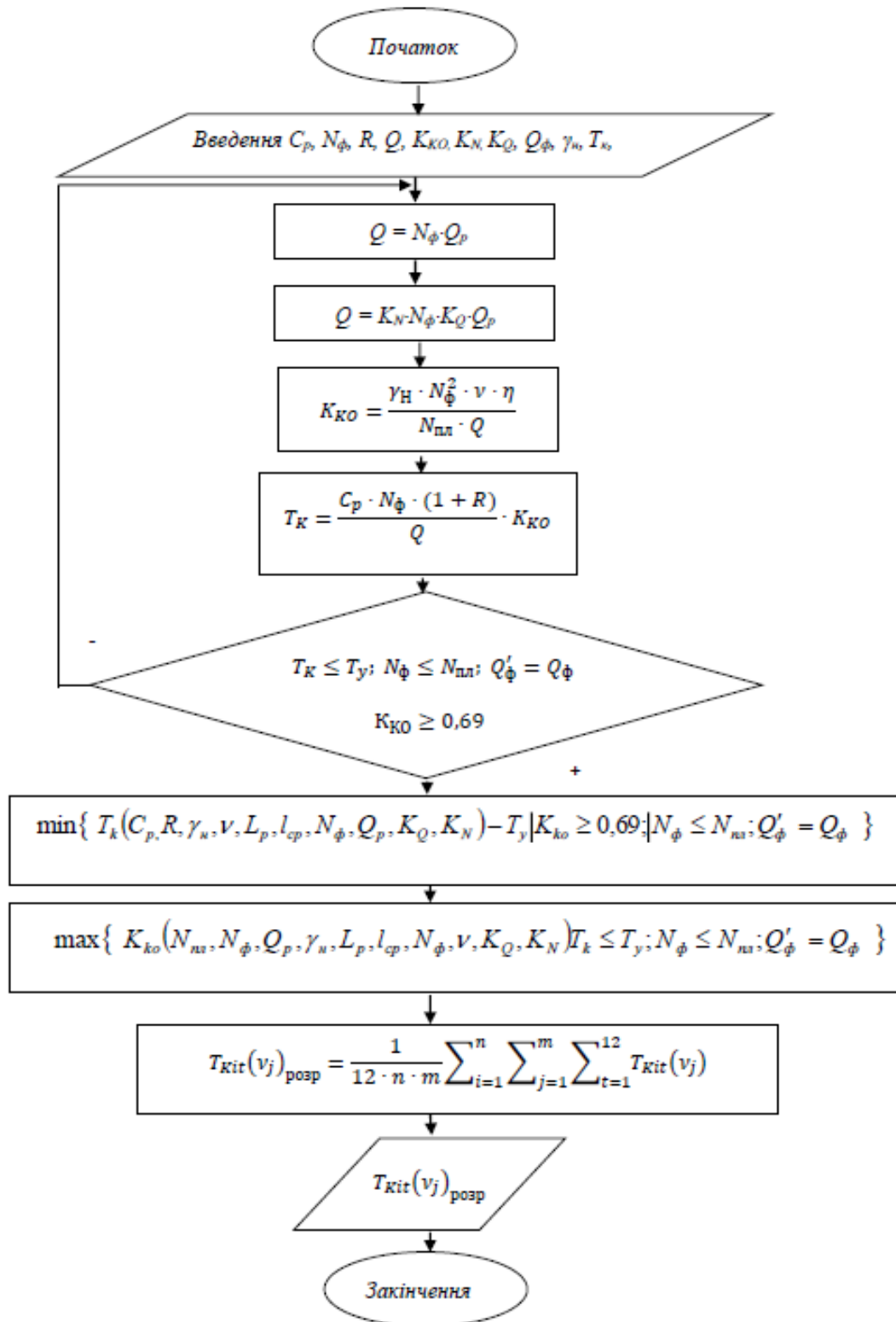


Рисунок 1 – Алгоритм економіко-математичної моделі для формування тарифів на міські пасажирські перевезення

На основі викладеного, розрахунковий тариф на пасажирські перевезення пропонується знаходити за рахунок розв’язання двох завдань.

Математичні обмеження представлені у такому вигляді:

1. Мінімізація різниці між тарифом на пасажирські перевезення з урахуванням якості та тарифом, встановленим органами місцевого самоврядування, за умови, що коефіцієнт якості обслуговування пасажирів не нижче за задовільний рівень, фактична кількість рейсів

не перевищує планового значення, фактичний обсяг перевезень за маршрутом за рік дорівнює обсягу перевезень за рік на цьому ж маршруті (5), отриманому в результаті моделювання.

$$\min T_k(C_p, R, \gamma_n, v, L_p, l_{cp}, N_\phi, Q_p, K_Q, K_N) - T_y | K_{ko} \geq 0,69; N_\phi \leq N_{nl}; Q'_\phi = Q_\phi. \quad (5)$$

2. Максимізація (6) коефіцієнта якості обслуговування пасажирів (K_{ko}) за умови є перевищення встановленого органами місцевого самоврядування тарифу на пасажирські перевезення (T_y).

$$\max K_{ko}(N_{nl}, N_\phi, Q_p, \gamma_n, L_p, l_{cp}, N_\phi, v, K_Q, K_N) | T_k \leq T_y; N_\phi \leq N_{nl}; Q'_\phi = Q_\phi, \quad (6)$$

- де T_k – тариф на пасажирські перевезення з урахуванням якості, грн;
 C_p – середня собівартість пасажирських перевезень за рейс, грн;
 R – рентабельність, %;
 γ_n – нормативний коефіцієнт використання місткості рухомого складу;
 v – номінальна місткість рухомого складу, пас.;
 L_p – протяжність рейсу, км;
 $l_{порієн}$ – середня дальність поїздки пасажирів, км;
 N_ϕ – фактична кількість рейсів, од.;
 N_{nl} – кількість планових рейсів, од.;
 Q_p – об'єм перевезень за рейс, отриманий у результаті обстеження пасажиропотоків, пас.;
 K_Q – коефіцієнт управління обсягом перевезень за рейс;
 K_N – коефіцієнт управління фактичною кількістю рейсів;
 T_y – тариф на пасажирські перевезення, встановлений органами місцевого самоврядування, грн;
 K_{ko} – коефіцієнт якості;
 Q_ϕ – фактичний обсяг перевезень за маршрутом протягом року, пас.;
 Q'_ϕ – обсяг перевезень, отриманий у результаті оптимізації, пас.

Підприємствам міського пасажирського транспорту можна рекомендувати виконувати кількість рейсів, розраховану у процесі моделювання. Із застосуванням розробленої економіко-математичної моделі, контролюючі установи органів виконавчої влади можуть відстежувати рівень якості обслуговування.

У роботі показано, що за допомогою розробленої моделі знаходження розрахункового тарифу на пасажирські перевезення підприємства пасажирського транспорту можуть визначати необхідну кількість рейсів та одиниць рухомого складу для підтримки якості перевезень на належному рівні. При цьому можна вибрати необхідну місткість рухомого складу, коли тариф на пасажирські перевезення буде мінімальним, а якість обслуговування – у межах задовільного рівня.

З використанням розробленої економіко-математичної моделі можна забезпечити:

- задоволення потреб населення у перевезеннях за кожним маршрутом;
- використання рухомого складу необхідної місткості задля забезпечення належного рівня обслуговування;
- регулярність руху (за допомогою обліку з розрахунку тарифу на пасажирські перевезення коефіцієнта регулярності);
- створення необхідних зручностей пасажирам у дорозі (у разі, коли відношення нормативного коефіцієнта використання місткості рухомого складу до фактичного знаходиться на досить високому рівні);

– встановлення такої величини розрахункового тарифу на пасажирські перевезення, яка не перевищувала б величини встановленого тарифу на пасажирські перевезення. У цьому випадку також враховуються інтереси директивних органів, оскільки відбувається економія коштів у бюджеті, які спрямовувалися на виплату субсидій через різницю між економічно обґрунтованим тарифом та тарифом, встановленим директивними органами.

Таким чином, дотримано інтереси трьох сторін: транспортних підприємств, споживачів послуг міського пасажирського транспорту та держави.

У разі, якщо реальні можливості бюджету менші за необхідні, можна відкоригувати – величину тарифу у бік збільшення або зменшити норму прибутку. Такі статті витрат, які підприємства можуть самі забезпечити, якщо їхня діяльність буде рентабельною, тобто, якщо з бюджету надаватиметься повною мірою фінансування можна буде виключити капітальний ремонт та придбання рухомого складу, які підприємства зможуть забезпечити власними коштами. Щоб визначити бюджетні субсидії суб'єктам господарювання, які здійснюють перевезення на комерційній основі, необхідно окреме дослідження собівартості перевезення на комерційному транспорті, яке важко у зв'язку з відсутністю у них подібної звітності. Витрати суб'єктів господарювання, які мають у своєму розпорядженні невелику кількість транспортних засобів, як правило, нижче витрат муніципальних підприємств з наявністю великої чисельності персоналу, виробничої бази та парку рухомого складу. Крім того, не всі господарюючі суб'єкти здійснюють перевезення пільгових категорій громадян, отже, частка покриття витрат доходами від продажу квитків значно вища, ніж на муніципальних підприємствах. Таким чином, є можливість, що витрати комерційних перевізників на перевезення пасажирів не перевищать соціально орієнтований тариф, і потреба в бюджетному фінансуванні їхніх підприємств відпаде [15].

У розробленій методиці використовуються такі показники, як сплатоспроможний попит населення, якість перевезень та прибутковість, рентабельність підприємства пасажирського транспорту. Розрахунок тарифу на пасажирські перевезення у цій методиці проводиться у 4 етапи. У першому етапі визначається мінімальний тариф на пасажирські перевезення (T_{min}). Рівень цього тарифу забезпечить підприємства пасажирського транспорту потрібними доходами. Встановлення тарифу нижче за рівень (T_{min}) призведе до збиткової діяльності підприємства. На другому етапі визначається максимальний тариф на пасажирські перевезення (T_{max}). Цей тариф обчислюється з урахуванням платоспроможного попиту населення. На етапі необхідно розрахувати тариф на пасажирські перевезення з урахуванням показника якості (T_k). При розрахунку тарифу T_k враховуються такі показники якості, як коефіцієнт використання місткості рухомого складу та коефіцієнт регулярності руху. Четвертий етап передбачає порівняння тарифу, розрахованого з урахуванням показника якості (T_k), з мінімальним (T_{min}) та максимальним тарифом (T_{max}) (табл. 2). Діяльність передбачається, якщо встановлений тариф на пасажирські перевезення дорівнює тарифу на пасажирські перевезення з урахуванням якості (T_k).

Таким чином, для того, щоб гарантовано забезпечити населення транспортними послугами, необхідно:

- 1) визначити сплатоспроможний попит населення на послуги міського пасажирського транспорту шляхом встановлення частки транспортних витрат у середньомісячному доході жителів області;
- 2) визначити середньомісячний дохід як середньозважену величину за питомою вагою розподілу мешканців за доходами, тобто не враховуються працівники, які отримують дуже низькі і дуже високі доходи;
- 3) розрахувати максимальний рівень тарифу, перевищення якого негативно позначиться на соціальному становищі населення; при цьому витрати на транспортні послуги (частка транспортних витрат, помножена на середньомісячний дохід) поділяються на середню кількість поїздок на місяць.

Таблиця 2 – Порівняння тарифів на пасажирські перевезення

Умови	Рекомендації
Якщо $T_{min} < T_{max}$ і $T_K > T_{min}$	Управління транспорту і зв'язку міськвиконкому може залежно від рівня обслуговування визначати тариф на пасажирські перевезення з урахуванням якості (T_K) у межах від мінімального (T_{min}) до максимального тарифу (T_{max}).
Якщо $T_{min} < T_{max}$ і $T_K < T_{min}$	У цій ситуації підприємство перебуває у збитку. Необхідно підвищити тариф на пасажирські перевезення з урахуванням якості (T_K) до рівня мінімального тарифу (T_{min}) з поліпшенням якості перевезень. У даному випадку можна використовувати більшу кількість рухомого складу на лінії, при цьому коефіцієнт використання місткості стане меншим, знизиться час очікування пасажирів на зупиночних пунктах, тобто зменшиться інтервал руху міського пасажирського транспорту. Або підвищити коефіцієнт регулярності руху, виконуючи кількість рейсів, ближчу до планових.
Якщо $T_{min} < T_{max}$ але $T_K > T_{min}$	Рекомендується знижувати тариф та пасажирські перевезення з урахуванням якості (T_K) до величини максимального тарифу (T_{max}), але намагатися зберігати прийнятну якість.

Зазначимо, що тарифна політика має стимулювати різні транспортно-економічні зв'язки, забезпечувати соціально-значущі перевезення та доступність життєво важливих транспортних послуг для всіх без винятку верств населення. Зусилля транспортників мають бути спрямовані на підвищення ефективності транспорту при поєднанні державних та регіональних інтересів, інтересів населення та транспортних підприємств. Зі сказаного вище зрозуміло, що ефективність розвитку пасажирського транспорту необхідно оцінювати в комплексі заходів соціально-економічного розвитку регіону, а не тільки за доходами транспортних підприємств.

Висновки

1. Отримані результати дозволили встановити, що для розробки методики тарифоутворення треба враховувати принципи тарифної політики при організації міських пасажирських перевезень та інтереси підприємств пасажирського транспорту.

2. Показано, що для розрахунку тарифу на пасажирські перевезення, необхідно введення коефіцієнту використання місткості рухомого складу та коефіцієнту регулярності руху.

3. Доведено, що при визначенні величини тарифу на пасажирські перевезення треба враховувати принципи тарифної політики при організації пасажирських перевезень та оцінювати його в комплексі заходів соціально-економічного розвитку регіону, а не тільки за доходами транспортних підприємств.

4. Показано, що для визначення тарифу на пасажирські перевезення треба враховувати платоспроможність населення на послуги міського пасажирського транспорту шляхом встановлення частки транспортних витрат у середньомісячному доході мешканців регіону.

Перспективи подальших досліджень

Розробка схеми, при якій, концентрація коштів отриманих від надання послуг по перевезенню пасажирів у містах повинна бути зосереджена в одній установі, наприклад – Управлінні транспортної, дорожньої інфраструктури і зв'язку міської ради.

Це дасть змогу повністю керувати процесом перевезень мешканців міст транспортом загального користування (фінансові потоки, графіки руху, кількість і відповідність вимогам транспортних засобів), незалежно від форми власності підприємств перевізників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Lubyany P. V., Voytovic O. A., Lubyana N. P. A mathematical model for determining the rational version of a passenger route network// *Методи та інструменти аналізу і прогнозування ринкової ситуації в забезпеченні стійкості суб'єктів господарювання: монографія / за заг. ред. Н. В. Шандової. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. – С. 160–178.*
2. Ткач В. О., Луб'яний П. В., Войтович О. А. Модель впровадження додаткових зупинок міського пасажирського транспорту. *Вісник Херсонського національного технічного університету – № 4(75). – 2020. – С. 20–27.*
3. Луб'яний П. В., Антоняк П. О. Формування раціональної схеми оплати за надання послуг по перевезенню пасажирів в містах. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні херсонщини матеріали Міжнародної науково-практичної конференції 26–28 квітня 2023 р. У двох томах. Том 2. – С. 302–306.*
4. Понкратов Д. П. Формалізація взаємозв'язку між показниками рівня заповнення міських пасажирських транспортних засобів. *Комунальне господарство міст. Харків, 2020. Т. 6. № 152. С. 196–203.*
5. Звіт про науково-дослідну роботу «Обстеження пасажиропотоків на міських автобусних та тролейбусних маршрутах загального користування в м. Херсон»; ХНТУ договір від 23.07.2021 р. № 148 – 2021 – 51 с.
6. Макаренко В. Д., Луб'яний П. В., Войтович О. А. Якість пасажирських транспортних послуг на основі нефінансових показників. *ВІСНИК ХНТУ № 1(84), 2023 р. С. 48–55.*
7. Rea J. C. Designing Urban Transit Systems: An Approach to the Route Technology Selection Problem. In *Highway Research Record 417, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1972, P. 49–61.*
8. Sharp G. P. Public Transit System Network Models: Consideration of Guideway Construction, Passenger Travel and Delay Time and Vehicle Scheduling Cost. Ph.D. dissertation. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1974.
9. Hsu J. and Surti V. H. Decomposition Approach to Bus Net – work Design, *Transportation Engineering Journal of the ASCE, Vol. 103, 1977, P. 447–439.*
10. Juskevicius P., Valeika V., Burinskiene M., Paliulis G. Lithuanian urban transport systems, Klaipeda: monograph. Vilnius: Technika, 2006. – 181 p.
11. Small, Kenneth A. *Urban transportation economics.* Philadelphia, Penn.: Harwood Academic Publisher, 1992.
12. Олійник Н. М., Макаренко С. М. Особливості використання методів бізнес-аналізу щодо забезпечення економічної стійкості та сталого розвитку підприємства. *Методи та інструменти аналізу і прогнозування ринкової ситуації в забезпеченні стійкості суб'єктів господарювання : монографія / за заг. ред. Н.В. Шандової. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 280 с.*
13. Ponkratov D., Gyulyev N., Voronko V., Ostashevskiy S., Psol S., Bugayov I. Development of models for assessing a driver's failurefree operation in a transportation system under conditions of traffic congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. №3, P. 24–38. Режим доступу: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081979671&doi=10.15587%2f1729-4061.2020.194449&partnerID=40&md5=ea68bf4fa8fcbeca31192ace21825a82>.
14. Ponkratov D., Davidich Y., Kopytkov D., Samchuk G., Kush Y. Public Transit Crowding Estimation Indicators: Comparative Analysis, Conditions of Application, Interaction. *In International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems.* 2023. Vol. 536. P. 764–774. Режим доступу: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85144237140&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction&sid=b551781d5d7484e385b7c420598edf04&sot=b&sdt=b&sl=122&s=TITLE-ABS-KEY%28Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparati>

ve+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction%29&relpos=0&citeCnt=0&search Term.

15. Horbachov P., Makarichev O., Svichynskiy S., Ivanov I. Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities. *Transportation*, 2022, 49(1), pp. 115–136. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-021-10168-6>.

REFERENCES

1. Lubyany, P. V., Voytovic, O. A., Lub'yanaya, N. P. (2021). Mathematical model dlya opredeleniya rational version of passenger route network // *Metody i instrumenty analiza i prognozirovaniya rynochnoy situatsii v obespechenii ustoychivosti sub'yektiv khozyaystvovaniya: monografiya / pod obshch. red. N. V. Shandovoy.* – Kherson: OLDI-PLYUS, 2021. – S. 160–178.

2. Tkach, V. A., Lubyany, P. V., Voytovich, O. A. (2020). Model' vnedreniya dopolnitel'nykh ostanovok gorodskogo passazhirskogo transporta. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* – №4(75). – S. 20–27.

3. Lubyany, P. V., Antonyak M P. O. (2023). Formirovaniye ratsional'noy skhemy oplaty za predostavleniye uslug po perevozke passazhirov v gorodakh. *Sinerhiya nauki i biznesa v poslevoynnom obnovenii khersonshchiny materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 26–28 aprelya 2023 g. V dvukh tomakh Tom 2 S. 302–306.*

4. Ponkratov, D. P. (2020). Formalizatsiya vzaimosvyazi mezhdu pokazatelyami urovnya zapolneniya gorodskikh passazhirskikh transportnykh sredstv. *Kommunal'noye khozyaystvo gorodov. Khar'kov. T. 6. № 152. S. 196–203.*

5. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote (2021). «Obsledovaniye passazhiropotokov na gorodskikh avtobusnykh i trolleybusnykh marshrutakh obshchego ispol'zovaniya v g. Kherson»; KHNTU dogovor ot 23.07. № 148 – 2021 – 51 s.

6. Makarenko, V. D., Lubyany, P. V., Voytovich, A. A. (2023). Kachestvo passazhirskikh transportnykh uslug na baze nefinansovykh kharakteristik. *VESTNIK KHNTU № 1(84). S. 48–55.*

7. Rea, J. C. Designing Urban Transit Systems: Na prilozhenii k Route Technology Selection Problem. V *Highway Research Record 417, HRB, National Research Council, Washington, DC, 1972, P. 49–61.*

8. Sharp, G. P. (1974). Public Transit System Network Models: Konsul'tatsiya po stroitel'stvu, Paskhengeru puteshestviya i Dolgosrochnomu kontinentu i Avtomobil'naya Scheduling Cost. Ph.D. dissertation. Georgia Institute of Technology, Atlanta.

9. Hsu, J. and Surti, V. H. (1977). Unichtozheniye prilozheniy k bus net – rabota dizayna, perevozka stroitel'nykh materialov ASCE, Vol. 103, P. 447–439.

10. Juskevicius, P., Valeika, V., Burinskiene, M., Paliulis, G. (2006). Lithuanian urban transport systems, Klaipeda: monograph. Vilnius: Technika. – 181 p.

11. Small, Kenneth A. (1992). *Urban transportation economics.* Philadelphia, Penn.: Harwood Academic Publisher.

12. Oleynik, N. M., Makarenko, S. M. (2021). Osobennosti ispol'zovaniya metodov biznesanaliza po obespecheniyu ekonomicheskoy ustoychivosti i ustoychivomu razvitiyu predpriyatiya. *Metody i instrumenty analiza i prognozirovaniya rynochnoy situatsii v obespechenii ustoychivosti sub'yektiv khozyaystvovaniya: monografiya / pod obshch. red. N.V. Shandovoy.* Kherson: OLDI-PLYUS. 280 s.

13. Ponkratov, D., Gyuleyev, N., Voronko, V., Ostashevskiy, S., Psol, S., Bugayov, I. (2020). Razvitiye modeley dlya pooshchreniya driver's failurefree operation in transportation system under conditions of traffic congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* №3, P. 24–38. Rezhim dostupu: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081979671&doi=10.15587%2f1729-4061.2020.194449&partnerID=40&md5=ea68bf4fa8fcbeca31192ace21825a82>.

14. Ponkratov, D., Davidich, Y., Kopytkov, D., Samchuk, G., Kush, Y. (2023). Public Transit Crowding Estimation Indicators: comparative analysis, Conditions of Application, Interaction. In *International Conference on Smart Technologies v Urban Engineering. Lecture*

Notes v Networks and Systems. Vol. 536. P. 764–774. Rezhim dostupa: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85144237140&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Public+transit+crowding+estimation+in+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction&sid=b551781d5d7484e385b7c420598edf04&sot=b&sdt=b&sl=122&s=TITLE-ABS-KEY%28Public+transit+crowtions+of+application%2c+interaction%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm>.

15. Khorbakhov, P., Makarikhev, O., Svichinskiy, S., Ivanov, I. (2022). Framework dlya proyektirovaniya skhemy torgovykh resursov dlya transportnoy pomoshchi modelirovaniya v gorodakh. *Transportation*, 2022, 49(1), p. 115–136. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-021-10168-6>.

Lubyanyi P. V., Voytovych O. A., Kuzmenko I. O. AVAILABILITY OF PASSENGER TRANSPORT FOR THE PUBLIC FROM THE POINT OF VIEW OF TARIFF FORMATION

The lagging behind the development of passenger transport from the needs of the population in movement causes socio-economic problems and negatively affects the work of other branches of the city's economy. The operation of public transport is an important indicator of the quality of life in the city and one of the criteria for evaluating the performance of local authorities. When organizing passenger transportation, it is necessary to conduct a competent price policy, since the financial stability of transport enterprises depends on it. For a significant part of the population, transportation costs account for a significant share of total consumer spending. Passenger transport affects the transport accessibility of regions, the level of transport mobility of the population and the well-being of citizens - they have great social significance. The work shows that with the help of the developed model of finding the estimated tariff for passenger transportation, passenger transport enterprises can determine the necessary number of flights and units of rolling stock to maintain the quality of transportation at the appropriate level. At the same time, you can choose the required capacity of the rolling stock, when the tariff for passenger transportation will be minimal, and the quality of service will be within a satisfactory level. From the point of view of economic expediency, passenger transportation must be organized in such a way as to provide the population with the necessary communications, while energy, financial and other resources must be effectively used at the required level of quality service. The clearly expressed socially significant nature of the work of public passenger transport should be supported by the guarantee of high quality transportation for the least well-off categories of passengers. It is proved that when determining the amount of the tariff for passenger transportation, it is necessary to take into account the principles of the tariff policy in the organization of passenger transportation and evaluate it in the complex of measures of socio-economic development of the region, and not only according to the income of transport enterprises.

Key words: tariff; passenger transportation; salary; schedule; comfort; passenger transport; profitability of transportation; quality of transportation.

© Луб'яний П. В., Войтович О. А., Кузьменко І. О.

Статтю прийнято
до редакції 13.11.2023

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ
AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL IN A STORM

Mateichuk V., senior lecturer of the ship handling department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651;

Zinchenko S., doctor of technical sciences, professor of the ship handling department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Tovstokoryi O., Ph.D., deep sea captain, head of the ship handling department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028.

Adverse weather and sea conditions are the most difficult sailing conditions on the route. Long rolling, need for constant concentration of attention greatly exhausts the crew and leads to wrong decisions. Existing methods of storming are not very effective, as they have low accuracy, significant time delays between obtaining data for calculation and determining safe movement parameters, lack of possibility of constant determination of safe movement parameters, difficulty in identifying the dominant factor from the system of dangerous factors, intuitive assessment of the level of danger. The purpose of the research is to develop a method of automatic storming that will ensure safe sailing in storms. The method, algorithmic and software of the automatic ship control module in the storm have been developed, which allows forming safe and optimal parameters of the ship's movement. The obtained results are explained by the use of an on-board computer, solving, at each step of the on-board computer, an optimization problem with nonlinear constraints. The use of nonlinear constraints allows to optimize the objective function taking into account the dangers of stormy sailing: synchronous and parametric resonance, loss of stability in following seas, impact of group waves in the stern of the ship, exceeding permissible loads on the structure of the ship's hull, etc. The obtained results differ from known solutions in that for the first time the problem of automatic optimal control of ship in a storm is solved, which allows to significantly reduce the influence of human factor on storm processes and increase the safety of shipping. The results obtained are reproducible and scalable. Extensibility is explained by taking into account other hazards in the form of restrictions on optimization parameters. The theoretical significance of the obtained results lies in the application of the nonlinear optimization method with linear and nonlinear constraints of the type of inequalities to find optimal and safe storm parameters. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed methods in automatic ship control module in a storm, which allows to reduce the influence of human factor on storming processes, reduce fatigue of the crew, and increase the safety of navigation.

Key words: navigation safety; human factor; intelligent vehicles; automatic control; storm diagrams; optimization with constraints; dangerous areas.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.120–132

Introduction. Adverse weather conditions are the most difficult sailing conditions on the route. Long rolling, need for constant concentration of attention greatly exhausts the crew and leads to wrong decisions. The situation worsens also due to the fact that during a storm, such dangerous phenomena as synchronous and parametric resonances occur [1], much more often, deforming forces and moments increase, which can reach the maximum allowable values and lead to the destruction of the hull, the lateral stability of the ship in following seas, decreases, etc. Guidelines and Recommendations for safe sailing in difficult weather conditions are given in IMO documents.

The existing methods of storming are not very effective, as they have low accuracy, due to the use of visual methods of estimating the parameters of turbulence and manual graphic constructions, significant time delays between obtaining data for calculation and determining safe parameters of movement, lack of constant measurement of parameters of turbulence and refinement of safe parameters of movement, the difficulty of identifying the dominant factor from the system of dangerous factors, intuitive assessment of the level of danger. Therefore, improving the safety of storm sailing is an urgent scientific and technical task.

Problem statement. Develop a module of automatic control vessel in a storm that will ensure ship controllability, avoidance of capsizing hazards, synchronous and parametric resonances, loss of stability in following seas, and avoidance of group waves impacts on the stern.

Analysis of recent research and publications. The question of safe sailing in a storm has been previously considered by many authors.

Thus, the book [2] provides information on: automated means of monitoring the seaworthiness of ships (ASCM); data on ASCM information sensors; theoretical foundations of seaworthiness calculation; concept of methods for choosing the optimal transition plan; current samples of ship ASCM; advantages of using ASCM.

In the book [3], the author provides data on: the linear theory of oscillation on calm water, on regular rolling and pitching; basics of the nonlinear theory of rolling; calculation of forces, bending and torques acting on the ship's hull; calculation of the safe speed and course of the ship during a storm using the universal storm chart.

In the work [4], the author cites dangerous phenomena that can occur during storm sailing, in particular: surf-riding and broaching, which occur when the vessel is on the steep front slope of a high following wave. In this case, the ship can be accelerated by going down the wave, but there is a danger of capsizing with a sudden change of course; reduction of intact stability when riding a wave crest amidships, occurs when the ship moves on the crest of a wave. The danger of the situation is a significant decrease in stability, especially when the wavelength is (0.6–2.3) the length of the vessel; synchronous rolling motion, also known as synchronous resonance, occurs when the period of the ship's own oscillations coincides with the period of oncoming waves; parametric roll motions, also known as parametric resonance, leads to a sharp increase in roll amplitude due to a periodic change in stability at the crests and troughs of waves. The author describes the possible situations of occurrence of parametric resonance: the period of natural oscillations of the vessel coincides with the period of waves, the stability of the vessel decreases to a minimum once per oscillation period, the situation is characterized by asymmetric oscillations, when the roll amplitudes in different directions differ from each other, the transition of this type of parametric resonance is synchronous; when the period of the ship's own oscillations is twice as long as the wave period, the stability of the vessel decreases to a minimum of two times during the oscillation period, the situation is characterized by symmetrical oscillations; when there is a consistent and periodic submersion and surfacing of the stern and bow part of the vessel, which can lead to serious rolling movements, even if the vessel is stable; when the periods of pitching and drifting coincide with the period of the waves. The work also includes mathematical formulas that describe the conditions for the occurrence of dangerous phenomena.

In the article [5] researchers generate realistic ocean environmental fields and analyze actual sea data. Then, derive a modular maneuvering model reflecting environmental disturbances for further simulations. The correlation and multi-regression analyses are performed based on measured data and environmental factors, which illustrate that the abnormal rudder angles are caused by reduced steering effectiveness. The maneuvers are simulated by adopting the attenuation function, and the simulation results show fair agreement with the measured data. Significant wave height, wind speed, mean wave period, current speed, wind apparent direction, and wave encounter angles are found to be the most statistically considerable factors of rudder attenuation in the studied cases. The results and conclusions obtained from this study are of great significance for the further exploration of actual ship maneuvering behaviors in seas.

In the article [6], the issue of increasing speed and reducing energy consumption during cargo and ballast voyages of a tanker is considered. Based on the results of experiments and observations carried out on the tanker itself, a method of increasing speed and reducing fuel consumption in stormy conditions is proposed. It is shown that an increase in speed and fuel saving can be achieved with the same wind and wave encountering angles. This rule must be taken into account both at the stage of voyage planning and in conditions of stormy sailing. The obtained results can be extended to other types of vessels.

The paper [7] investigated the occurrence of parametric resonance in October 1998 on the Post-Panamax C11 container ship. The vessel was exposed to extreme weather conditions and suffered significant losses and damage to containers stacked on deck. The conducted research made it possible to establish that a parametric resonance can occur in the roll channel on Post-Panamax

container ships. The values of possible accelerations and speeds were also determined, and the impact of these loads on the structure and lashing system of containers was determined.

The structure of the ship safety system at the stages of designing and operating ships is proposed in [8]. The composition of ship systems necessary to ensure the safety of sailing in stormy seas is considered. The use of multi-agent information processing technologies in the navigation safety system is proposed, and recommendations for the shipmaster regarding the choice of safe parameters of the ship's movement have been developed.

In the works [9, 10], methods of automatic control of a ship in a storm are considered. A universal storm diagram was constructed in relative coordinates, and resonance zones were determined. It is shown that the out-of-resonance zone is significantly smaller, compared to the out-of-resonance zone of Remez, which is explained by a decrease in the maximum speed of the vessel in a storm. Methods of automatic control under storm conditions are proposed, which allow to reduce the influence of human factor on the processes of controlling a ship in a storm, reduce crew fatigue, optimize control processes and increase the safety of navigation in general. The workability and efficiency of the developed methods are verified by mathematical modeling.

In the works [11], the method, algorithm and software of the automatic storming module were developed. Given that the ship's oscillatory process is dampened by dissipative forces and moments, low-energy wave frequencies are safe for the ship and do not lead to resonant rolling. Taking this into account, it is proposed to integrate a fast Fourier transform unit into the storm system to determine the spectrum of external influences, to consider only those components of the spectrum, whose energy does not exceed a critical value, which made it possible to reduce resonant zones and expand the possibilities of safe sailing.

The requirements of the Rule Note [12] apply to analysis criteria and ship motion modeling calculation of ships intended to be granted the additional class notation PaRoll1 and PaRoll2, as defined in NR467 Rules for Steel Ships, Pt. A, Ch. 1, Sec. 2. This Rule Note deals with the part of motion analysis which aims at performing parametric resonance and based on hydrodynamic calculations including ship motions response.

In the works [13, 14], synchronous or parametric rolling has been investigated and recommendations have been made to enable captains to recognize and avoid the risk of synchronous or parametric rolling before it becomes a threat. This helps to avoid losing containers.

Purpose and objectives of the research. The purpose of the research is to develop a method, algorithm and software of the automatic ship control module in a storm, which will allow automatic and optimal sailing in a storm that is safe from capsizing. Automatic ship control module in a storm allows determining optimal safe movement parameters in a storm, more accurate and faster than in manual mode by the navigator. Also automatic ship control module in a storm neutralizes human factors, which is very important in stressful conditions. The goal is achieved through the use of an on-board computer, and using it for finding the optimal and safe parameters of the ship's movement by conditional optimization of the given objective function, taking into account the restrictions on the movement parameters that ensure the ship's controllability, the absence of synchronous and parametric resonance, loss of stability in following seas, absence of broaching, absence of group wave impacts on the stern; maintenance of safe traffic parameters by the control system.

Materials and methods. We aim to solve the problem of automating navigation in storm by employing nonlinear optimization methods for the objective function with inequality constraints.

$$\begin{cases} F(V, K) \rightarrow opt \\ f_1(V, K) \leq 0 \\ f_2(V, K) \leq 0 \\ \dots \\ f_n(V, K) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

where $F(V, K)$ is the objective function to be optimized, $f_j(V, K) \leq 0, j=1..n$ is the constraint type of inequalities.

The given objective function and specified constraints (1) depend on the parameters of the ship's movement (speed V , *m/s* and course K , *degrees*), as well as on the parameters of the waves (direction, speed and wavelength). Of all the named parameters, only two are available for control – the ship's speed and course, which we will use for conditional optimization. Other parameters that we cannot influence during storm sailing (wave parameters, range of permissible speeds and courses, etc.) are used as external data when solving the optimization problem.

Known methods of determining dangerous zones of controls in adverse weather conditions consider only one harmonic of wave [3, 15]. By Fast Fourier transformation it is possible to obtain frequency-based representation (spectrum) from a time-based representation signal of the wave. Therefore, having a sequence of frequencies for calculating dangerous zones of controls in adverse weather conditions, choose only that frequency, which has high amplitude, that cannot fade away by damping coefficient. After that, automatic ship control module in a storm calculates dangerous zones of controls in adverse weather conditions separately for each frequency, with dangerous amplitude. The final dangerous zone should be a zone that is a union of zones of all frequencies.

Fig. 1 shows scheme of automatic ship control module in a storm in vessel control system. Navigational sensors measure the angular speed vector ω of vessel, the vessel speed vector V_m and course vessel K_m , the wave parameters sensors measure the wave course K_w , wave speed C , amplitude A and wave length λ . Information about wave parameters sensors fed on the safe movement parameters determining module for calculating safe speed and course of vessel in adverse weather conditions. Also, for this purpose, module needs to get navigational data and dangerous components of the spectrum for taking into account only frequencies with dangerous amplitudes. Components of the spectrum determining by Fast Fourier transformation module. Components of the spectrum are fed into the module of determination dangerous components of the spectrum. After that, dangerous components are sent to Safe movement parameters determining module. The Safe movement parameters determining module calculates the resonant Ω and non-resonant $\bar{\Omega}$ zone, considering the minimum and maximum speed of the vessel in a storm, in optimal way choose safe course K^* and safe speed V^* of vessel, taking into account the set of restrictions. Parameter V^* , is fed into the Engine Remote Control System which determines control signal Θ to Main engine control unit. Parameter K^* together with navigational data (Course of vessel K_m , angular yaw rate ω_z) is fed into the input of the PID controller. Deflection angle δ is fed into the Steering gear unit to maintain a safe course.

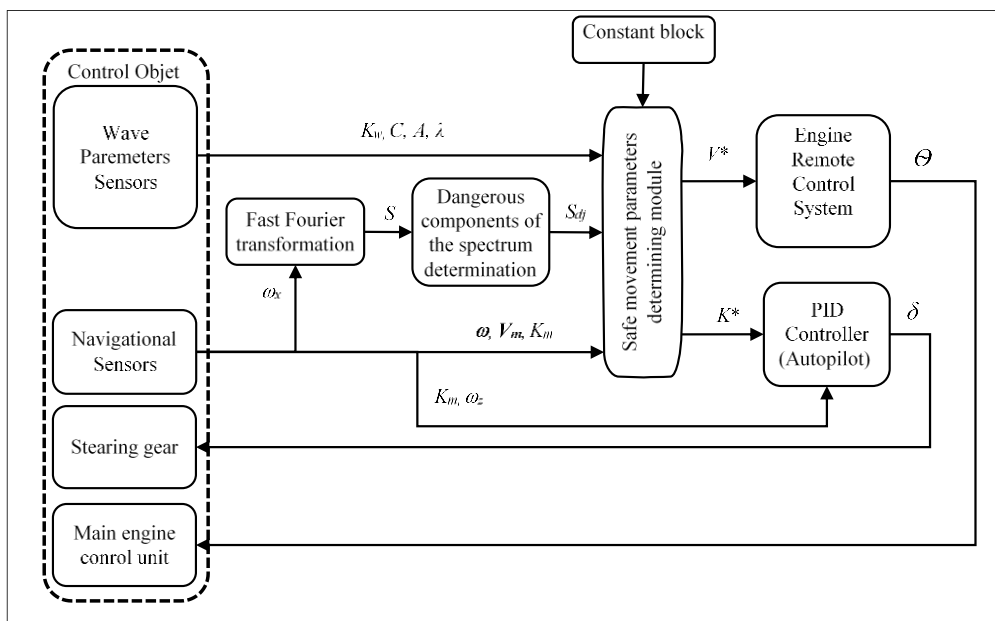


Figure 1 – Automatic ship control module in a storm in vessel control system

For safe sailing, it is necessary to ensure: the necessary speed of the ship to maintain controllability, the absence of conditions for the occurrence of phenomena dangerous for the ship to overturn, such as synchronous and parametric resonances, broaching, loss of stability in following seas, impacts of group waves on the stern.

Permissible vessel speeds consideration. The speed of the vessel cannot be less than the minimum speed V_{\min} at which controllability is lost and more than the maximum speed V_{\max} in storm conditions

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (2)$$

Synchronous resonance consideration. In the work [3] it is stated that synchronous resonance occurs under the condition that the ratio of the period of the ship's own oscillations T_C , sec to the period of encounter of the waves τ , sec waving the ship is within

$$0,7 \leq \frac{T_C}{\tau} \leq 1,3 \quad (3)$$

Using inequality (3), we identify a safe area outside the synchronous resonance zone.

$$1,3 \leq \frac{T_C}{\tau}, \frac{T_C}{\tau} \leq -0,3 \rightarrow 0,3 \leq \frac{T_C}{\tau} - 1, \frac{T_C}{\tau} - 1 \leq -0,3$$

$$\left| \frac{T_C}{\tau} - 1 \right| \geq 0,3 \quad (4)$$

The period of encounter τ of the waves is determined by the formula

$$\tau = \frac{\lambda}{C + V \cos q} \quad (5)$$

Here, where λ represents the wavelength in meters, C is the wave propagation speed in m/s, V is the vessel speed in m/s, and q is the angle of encounter, in degrees.

The angle of encounter of the wave is the angle between the diametrical plane of the vessel and the wave speed vector, it can be represented as the difference between the courses of the own vessel K and the wave direction K_w , in degrees

$$q = K - K_w + 180^0 \quad (6)$$

By combining inequality (4) and equations (5), (6), we derive a secure zone beyond the bounds of synchronous resonance.

$$\left| \frac{T_C(C + V \cos q)}{\lambda} - 1 \right| \geq 0,3 \quad (7)$$

Parametric resonance consideration. Parametric resonance leads to a sharp increase in roll amplitude due to a periodic change in stability at the crests and troughs of the waves. The most dangerous is parametric resonance, when the period of the vessel's own oscillations is twice the period of the waves [16]. In this case, the stability of the vessel decreases to a minimum twice during the oscillation period, the situation is characterized by symmetrical oscillations. The safe region outside the limits of this type of parametric resonance can be written as

$$\left| \frac{T_C}{2} - \tau \right| \geq \Delta T \quad (8)$$

where ΔT is the difference between the half period of the vessel's natural oscillations and the period of encounter of the waves, at which parametric resonance of this type does not yet occur.

The occurrence of parametric resonance is also possible, when the period of the vessel's own oscillations coincides with the period of the waves, the stability of the vessel decreases to a minimum once per oscillation period, the situation is characterized by asymmetric oscillations, when the roll amplitudes in different directions differ from each other. The safe region outside the limits of this type of parametric resonance can be written as

$$|T_C - \tau| \geq \Delta T \quad (9)$$

Decrease in stability in following seas consideration. Decrease in stability in following seas occurs due to a significant decrease in the underwater volume of the vessel's hull and the restoring moment. The area of the vessel's movement parameters, which is safe in terms, decreases in stability in following seas, is determined by a system of inequalities

$$\begin{cases} |\lambda - L| \geq \Delta\lambda \\ |V - C| \geq \Delta V \\ |K - K_w| \leq \Delta K \end{cases} \quad (10)$$

where $\Delta\lambda$ is the largest difference between the wave length λ and the length L of the vessel, at which decrease in stability in following seas occurs, ΔV is the largest difference between the vessel's speed and the wave speed, at which decrease in stability in following seas occurs, ΔK is the largest difference between the vessel's and the wave courses, at which it is possible to consider the motion in following seas.

Broaching consideration. The danger of broaching consists in turning the vessel along the wave with its subsequent capsizing [17]. The area of the vessel's movement parameters, which is safe with respect to broaching, is determined by a system of inequalities

$$\begin{cases} |\lambda - L| \geq \Delta\lambda \\ V \leq V_w \end{cases} \quad (11)$$

Wave grouping phenomena consideration. Taking into account the dangerous impacts of group waves on the stern. Ocean waves are a collection of irregular waves of different length, height and direction. When the waves come in from the stern and their speed is slightly higher than the ship's speed, the ship is continuously hit repeatedly and severely by a series of high waves, causing her maneuverability to become uncontrollable. Also, the impact of these waves leads to damage to the hull and steering. The dangerous area of the relationship between the ship's motion parameters and the waves is represented by the V/T diagram in "Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions," (IMO MSC.1/Circ.1228) [15].

Using the diagram and carrying out transformations similar to those given for equation (4), we will write down safe relations between the parameters of the ship's movement and the waves, which exclude the impact of group waves on the stern

$$\begin{cases} |K - K_w - 180| \geq 50 \\ \left| \frac{V}{T_w} - 1,65 \right| \geq 0,35 \end{cases} \quad (12)$$

Navigational limitations consideration. It is also important to take into account navigational restrictions. Information about dangers may be fed from other automatic analysis systems such as target vessels, navigational dangers, etc. The following inequality can be used to approximately find the course limit

$$K^* \neq K_{Dg} \pm \frac{2}{D_{Dg}} \quad (13)$$

where K^* is the calculated safe course in degrees, K_{Dg} is the course to navigational danger in degrees, D_{Dg} is the distance to navigational danger in miles, taken from radar.

Similarly, other restrictions are recorded, which exclude entering into dangerous regions of optimal parameters.

For the objective function, you may opt for a function, such as

$$F = (K^* - K_{SET})^2 \rightarrow \min \quad (14)$$

which will guarantee the minimum deviation of the safe course K^* from the specified K_{SET} or function

$$F = (V^* - V_{SET})^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

which will ensure the minimum deviation of the safe speed V^* from the goal speed V_{SET} , or other functions that will provide the desired control quality.

To find safe motion parameters V^* , K^* , which optimize the objective function (14), (15) with linear (2), nonlinear constraints (7) - (12) and taking into account inequality (13), we use the nonlinear optimization function like *f min con*(●) MATLAB

$$f \text{ min con} (@ \text{ fun}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{Aeq}, \mathbf{beq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ \text{ nonlcon}) \quad (16)$$

where *@ fun* is a link to the file with the objective function,

$\mathbf{x0} = (V(0), K(0))$ is the initial vector of parameters to be optimized,

\mathbf{A} is the matrix of the system of linear constraints of the type of inequalities, which is absent in our case,

\mathbf{b} is the vector of the right parts of the system of linear constraints of the type of inequalities, which is absent in our case,

\mathbf{Aeq} is the matrix of the system of linear constraints of the equalities type, which is absent in our case,

\mathbf{beq} is the vector of the right parts of the system of linear constraints of the equalities type, which is absent in our case,

$\mathbf{lb} = [-V_{\min}, -\pi]$ is the vector and components defining the lower limit of the change of the optimization parameters,

$\mathbf{ub} = [V_{\max}, \pi]$ is the vector and components determining the upper limit of the change of the optimization parameters,

@ nonlcon is the link to a file with a system of nonlinear constraints on optimization parameters

Realization of ship movement with optimal parameters V^* , K^* . To implement the movement of the vessel with the found parameters V^* , K^* the following system of automatic regulation of the ship's movement is used

$$\begin{cases} \Theta = \frac{V^*}{V_{\max}} \Theta_{\max} \\ \delta = k_{\varphi}(K - K^*) + k_{\omega}\omega + k_f \int (K - K^*) dt \end{cases} \quad (17)$$

where Θ is the deviation of the telegraph of the power plant, Θ_{\max} is the maximum deviation of the telegraph, δ is the deviation of the stern, K is the current rate, ω is the yaw angular velocity, k_{φ} , k_{ω} , k_f is the gain coefficients of the PID - regulator.

Below are the results of mathematical modeling of storm processes of the Ro-Ro passenger ferry 13 on the Navi Trainer 5000. In all experiments, the wind direction is $K_W = 0^\circ$ (north wind), $q = K - K_W = K$.

Fig. 2 shows graphs of changes in roll angle, trim angle, speed and course during the vessel acceleration to maximum speed in the absence of sea disturbance. As can be seen from the graphs, the vessel performs in one minute four full oscillations in the roll channel and twelve full oscillations in the trim channel, that is the period of natural oscillations of the vessel in the roll channel is $T_B = 15$ sec. and in the trim channel is $T_L = 5$ sec.

Fig. 3 shows graphs of changes in roll angle, trim angle, speed and course of the vessel for the initial course $K(0) = 45^\circ$, initial speed $V(0) = 0$ kn., initial sea disturbance 2 points. The vessel, moving on course $K(n) = 45^\circ$, accelerates to speed $V(n) = 19$ kn., after which the simulator is set to sea disturbance 11 points. During the sea disturbance, the speed of the vessel decreases to $V(n) = 7$ kn., but the vessel does not capsize. This is due to the fact that the parameters $\{V(n) = 7$ kn., $K(n) = 45^\circ\}$ lie outside the resonance zone.

Fig. 4 shows graphs of changes in roll angle, trim angle, speed and course of the vessel for the initial course $K(0) = 75^\circ$, initial speed $V(0) = 0$ kn., initial sea disturbance 2 points. The vessel, moving on course $K(n) = 75^\circ$, accelerates to speed $V(n) = 19$ kn., after which the simulator is set to sea disturbance 11 points. During the sea disturbance, the speed of the vessel decreases to $V(n) = 7$ kn., there is a resonance in the roll channel, the roll angles go beyond the allowable values and the vessel overturns (horizontal lines on graphs). This is due to the fact that the resonance conditions are satisfied for the speed $V(n) = 7$ kn. and course $K(n) = 75^\circ$.

Fig. 5 shows graphs of changes in roll angle, trim angle, speed and course of the vessel with automatic control of the vessel Ro-Ro passenger ferry 13 in a storm.

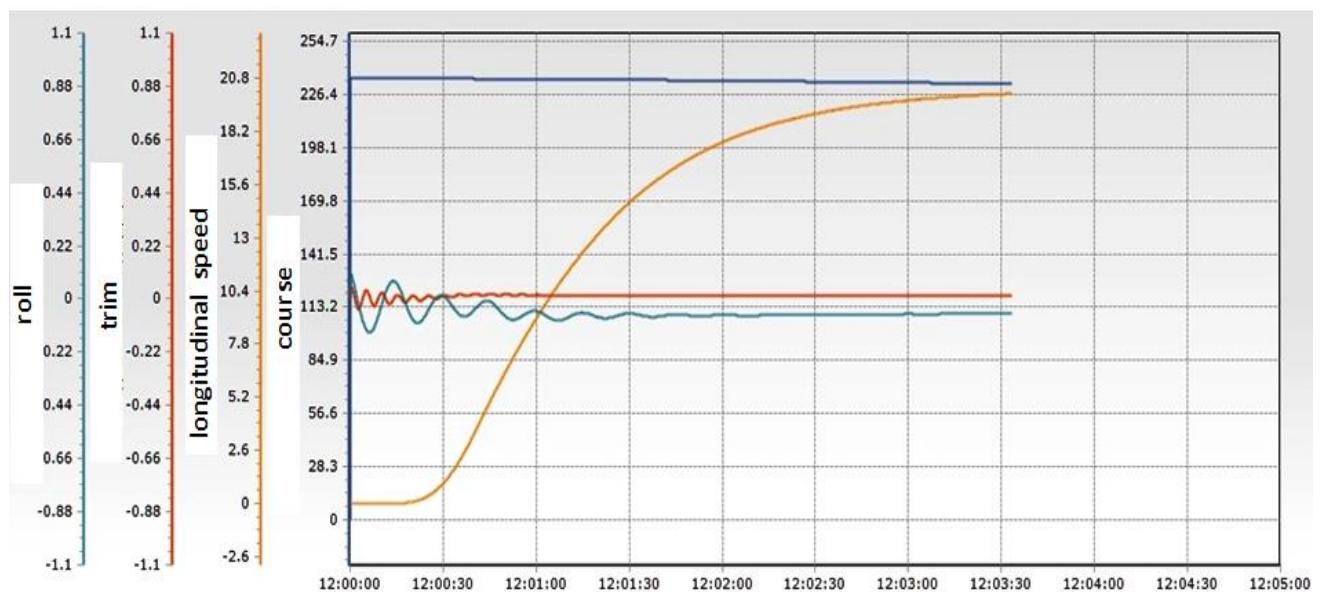


Figure 2 – Graphs of changes in roll angle, trim angle, speed and course during the vessel acceleration

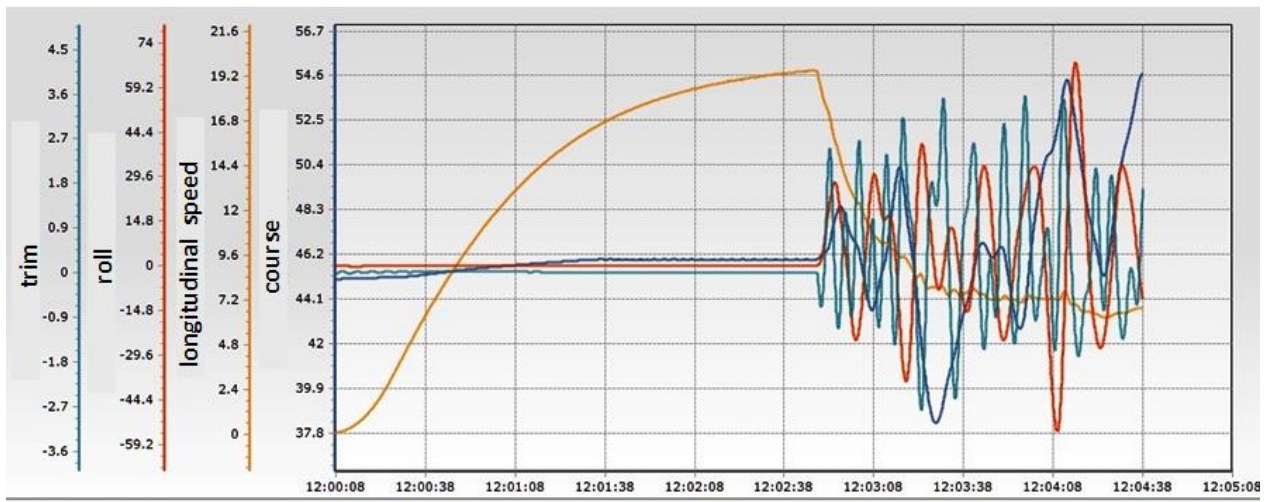


Figure 3 – Parameters of the Ro-Ro passenger ferry 13 movement by course $K(n) = 45^\circ$

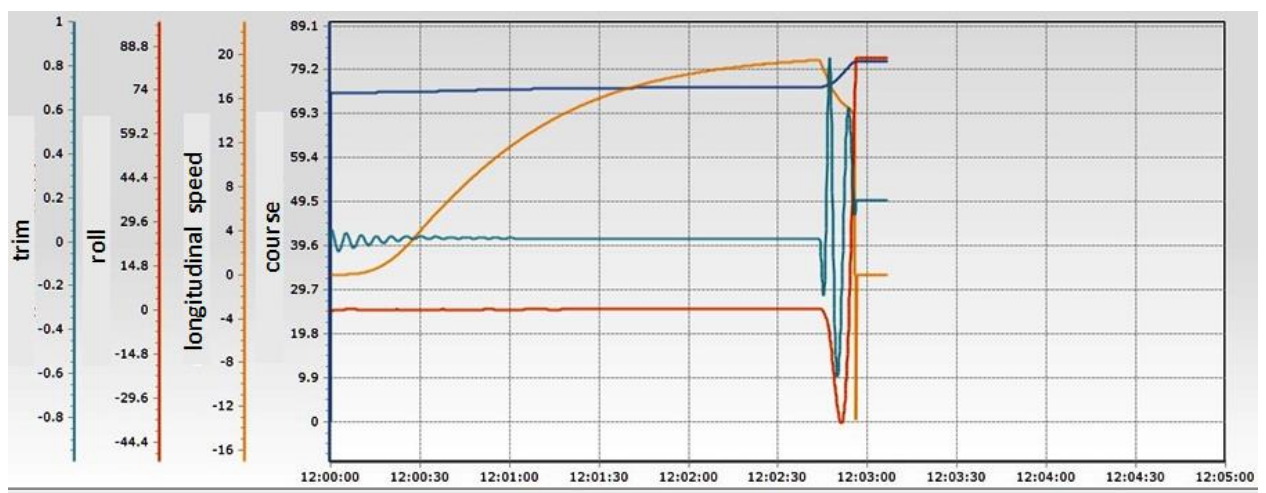


Figure 4 – Parameters of the Ro-Ro passenger ferry 13 movement by course $K(n) = 75^\circ$

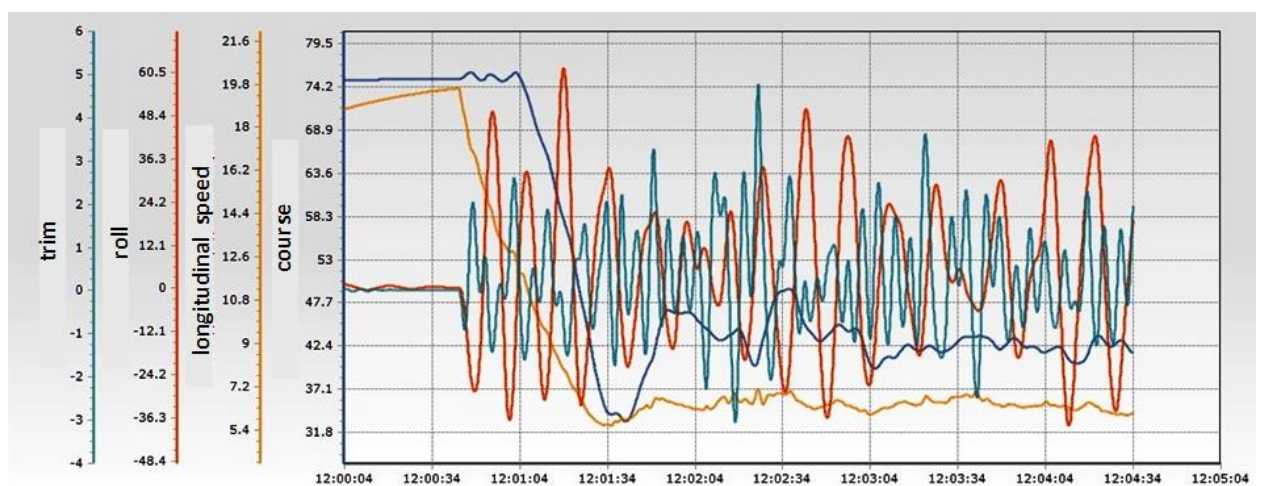


Figure 5 – Automatic control of the vessel Ro-Ro passenger ferry 13 in a storm

Main results and their discussion. The method, algorithmic and software of the automatic ship control module in a storm have been developed, which allows forming safe and optimal parameters of the movement of the ship. The obtained results are explained by the use of an on-board computer, solving, at each step of the on-board computer, an optimization problem with nonlinear constraints. Taking nonlinear constraints into account allows you to optimize the objective function, taking into account the dangers of stormy synchronous and parametric

resonance, loss of stability in following seas, impacts of group waves on the stern of the ship, exceeding permissible loads on the ship's hull structure, etc. The obtained results differ from known solutions in that for the first time the problem of automatic optimal control of a ship in a storm is solved, which allows to significantly reduce the influence of human factor on storm processes and increase the safety of navigation.

An experiment was conducted using a Imitation Modeling Stand [18]. The result of the experiment was compared with the data during the training sessions with manual control by the cadets (10 passing of each exercise).

Table 1 shows comparable data which include average rolling amplitude, average duration of being in dangerous zone. Also, it is important to point out that automatic mode allows to calculate the parameters of safe movement faster than the manual mode.

Table 1 – Compared data of the experiments and data during the training sessions with manual control by the cadets

Exercise	<i>Manual mode by navigator</i>		<i>Automatic mode</i>		<i>Relative deviation</i>	
	Average rolling amplitude, °	Average duration of being in the danger zone, min	Average rolling amplitude, °	Average duration of being in the danger zone, min	Average rolling amplitude, %	Average duration of being in the danger zone, %
№1	20,3	2,10	8,2	1,1	-59,6	-47,6
№2	26,7	3,15	11,3	1,2	-57,7	-61,9
№3	43,4	2,05	25,1	0,9	-42,1	-56,1

The developed methods can be used only in the on-board computer of the automatic ship motion control module. The results obtained are reproducible and scalable. Extensibility is explained by taking into account other hazards in the form of restrictions on optimization parameters.

Conclusions The method, algorithmic and software of the automatic ship control module in a storm have been developed. The obtained results are explained by the use of an on-board computer, by finding in the on-board computer the optimal and safe parameters of the ship's movement in a storm by solving the conditional optimization problem with restrictions on the optimization parameters. Limitations on optimization parameters take into account the dangers of stormy sailing. The theoretical significance of the obtained results lies in the application of the nonlinear optimization method with linear and nonlinear constraints of the type of inequalities to find optimal and safe storm parameters. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed methods in the automatic ship control module in a storm, which allows to reduce the influence of human factor on the storming processes, reduce fatigue of the crew, and increase the safety of navigation. Compared data of the experiments show, that using the automatic ship control module in a storm can reduce average rolling amplitude and duration of being in the danger zone by more than 40 percent.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Liwei Liu, Dakui Feng, Xianzhou Wang, Zhiguo Zhang, Jiawei Yu, Meixia Chen, Numerical study on the effect of sloshing on ship parametric roll, *Ocean Engineering*, Volume 247, 2022, 110612, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110612>.
2. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Заїчко С. І. Бортові автоматизовані системи контролю морехідності. Одеса: Фенікс, 2005. 272 с.
3. Ремез Ю. В. Качка корабля. Л: Суднобудування, 1983. 328 с.
4. Capt. Takuzo Okada. Marine Weather Ship Handling in Rough Sea, *Japan P&I Club. P&I Loss Prevention Bulletin* 45, 108 p., 2019.

5. Qianfeng Jing, Kenji Sasa, Chen Chen, Yong Yin, Hironori Yasukawa, Daisuke Terada. Analysis of ship maneuvering difficulties under severe weather based on onboard measurements and realistic simulation of ocean environment. *Ocean Engineering*. Volume 221, 2021, Article 108524 ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108524>.

6. Ershov A., Buklis P. Ways to increase speed and economy of tanker fuel during storm navigation. *Bulletin of the State Maritime and River Fleet University named after Admiral S. O. Makarov* 10 (6), pp. 1122–1131, 2018. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

7. France W., Levadou M., Treakle T., Paulling J., Michel R., Moore C. An investigation of head-sea parametric rolling and its influence on container lashing systems, *Marine Technology* 40(1), pp. 1-19. doi: 10.5957/mt1.2003.40.1.1.

8. Eremenko A., Zhukov Y. Smart onboard seafaring safety assurance system, *Electrical and computer systems* 22(98), pp. 293–300.

9. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Gritsuk I. Automatic vessel steering in a storm. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 66–74, 2022, <https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0009>.

10. Mateichuk V., Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P., Nahrybelnyi Ya, Popovych I. and Kobets V. Automatic Vessel Control in Stormy Conditions. *2-nd International workshop on computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021)*, 5 November, 2021. Rivne, Ukraine.

11. Матейчук В. М., Зінченко С. М., Носов П. С., Маменко П. П., Кириченко К. В. Автоматичне штормування із врахуванням наявного демпфування. *Матеріали II Міжнародної науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі"*, Херсон, 7 грудня 2022 року.

12. Parametric Roll Assessment. Rule Note NR 667 DT R00 E. Bureau Veritas. 92937 Paris La Défense Cedex – France. July 2019.

13. Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers. American Bureau of Shipping Incorporated by Act of Legislature of the State of New York, 1862. April 2019.

14. New DNV anti-roll app helps avoid container loss <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/New-DNV-anti-roll-app-helps-avoid-container-loss.html#article-lightbox1>.

15. International Maritime Organization, “Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions,” IMO MSC.1/Circ.1228, 2007. Available: <https://www.lisrc.com/revised-guidance-master-avoiding-dangeroussituations-adverse-weather-and-sea-conditions>.

16. Katsutoshi Takeda, Masanori Akagi, Kinya Ishibashi. Introduction of “Guidelines on Preventive Measures against Parametric Rolling”. *ClassNK Technical Journal* №7, 2023 (1).

17. Bonci M. The manoeuvrability of high-speed craft in the following sea. <https://doi.org/10.4233/uuid:843b41a4-fb9f-4211-8280-5767a03146eb>.

18. Zinchenko S., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Solovey O., Mamenko P., Grosheva O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems / *Electrical, Control and Communication Engineering*. – 2020. – Vol.16. – №2. P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ecce-2020-0009>.

REFERENCES

1. Liwei Liu, Dakui Feng, Xianzhou Wang, Zhiguo Zhang, Jiawei Yu, Meixia Chen. (2022). Numerical study on the effect of sloshing on ship parametric roll, *Ocean Engineering*, Volume 247, 110612, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110612>.

2. Vahushchenko, L. L., Vahushchenko, A. L., Zaichko, S. I. (2005). *Bortovi avtomatyzovani systemy kontroliu morekhidnosti*. Odesa: Feniks, 272 s.

3. Remez, Yu. V. *Kachka korablia*, L. (1983).: Sudnobuduvannia, 328 s.

4. Capt. Takuzo Okada. (2019). *Marine Weather Ship Handling in Rough Sea, Japan P&I Club. P&I Loss Prevention Bulletin* 45, 108 p.

5. Qianfeng Jing, Kenji Sasa, Chen Chen, Yong Yin, Hironori Yasukawa, Daisuke Terada. (2021). Analysis of ship maneuvering difficulties under severe weather based on onboard measurements and realistic simulation of ocean environment. *Ocean Engineering*. Volume 221, Article 108524 ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108524>.
6. Ershov, A., Buklis, P. (2018). Ways to increase speed and economy of tanker fuel during storm navigation. *Bulletin of the State Maritime and River Fleet University named after Admiral S. O. Makarov* 10 (6), pp. 1122–1131, doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.
7. France, W., Levadou, M., Treakle, T., Paulling, J., Michel, R., Moore, C. (2003). An investigation of head-sea parametric rolling and its influence on container lashing systems, *Marine Technology* 40(1), pp. 1–19. doi: 10.5957/mt1.2003.40.1.1.
8. Eremenko, A., Zhukov, Y. (2016). Smart onboard seafaring safety assurance system, *Electrical and computer systems* 22(98), pp. 293–300.
9. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Gritsuk, I. (2022). Automatic vessel steering in a storm. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 66–74, <https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0009>.
10. Mateichuk, V., Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Nahrybelnyi, Ya, Popovych, I. and Kobets, V. (2021). Automatic Vessel Control in Stormy Conditions. *2-nd International workshop on computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021)*, 5 November. Rivne, Ukraine.
11. Mateichuk, V. M., Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Mamenko, P. P., Kyrychenko, K. V. (2022). Avtomatychnе shtormuvannia iz vrakhuvanniam naiavnoho dempfuvannia. *Materialy II Mizhnarodnoi naukovo – praktychnoi konferentsii "Problemy staloho rozvytku morskoi haluzi"*, Kherson.
12. Parametric Roll Assessment. (2019). Rule Note NR 667 DT R00 E. Bureau Veritas. 92937 Paris La Défense Cedex – France.
13. Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers. (2019). American Bureau of Shipping Incorporated by Act of Legislature of the State of New York, 1862.
14. New DNV anti-roll app helps avoid container loss <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/New-DNV-anti-roll-app-helps-avoid-container-loss.html#article-lightbox1>.
15. International Maritime Organization, “Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions,” IMO MSC.1/Circ.1228, 2007. Available: <https://www.lisecr.com/revised-guidance-master-avoiding-dangeroussituations-adverse-weather-and-sea-conditions>.
16. Katsutoshi Takeda, Masanori Akagi, Kinya Ishibashi. (2023). Introduction of “Guidelines on Preventive Measures againts Parametric Rolling”. *ClassNK Technical Journal* №7.
17. Bonci, M. (2019). The manoeuvrability of high-speed craft in the following sea. <https://doi.org/10.4233/uuid:843b41a4-fb9f-4211-8280-5767a03146eb>.
18. Zinchenko, S., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Solovey, O., Mamenko, P., Grosheva, O. (2020). Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems / *Electrical, Control and Communication Engineering*. – 2020. – Vol.16. – №2. – P.58–64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ecce-2020-0009>.

Матейчук В. М., Зінченко С. М., Товстокорій О. М. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ СУДНОМ У ШТОРМ

Штормові умови плавання є одними із найбільш складних при плаванні на маршруті. Тривала хитавиця, необхідність постійної концентрації уваги дуже виснажує екіпаж та призводить до прийняття помилкових рішень. Існуючі методи штормування мало ефективні, так як мають низьку точність, значні затримки у часі між отриманням даних для розрахунку і визначенням безпечних параметрів руху, відсутність можливості постійного визначення безпечних параметрів руху, складність виявлення домінуючого фактору із системи небезпечних факторів, інтуїтивне оцінювання рівня небезпеки. Метою дослідження є розробка методу автоматичного штормування, який забезпечить безпечне плавання в шторм. Розроблено метод, алгоритмічне та програмне забезпечення модуля автоматичного штормування, які дозволяють формувати безпечні та оптимальні параметри руху

судна. Отримані результати пояснюються використанням бортового обчислювача, вирішенням, на кожному кроці бортового обчислювача, оптимізаційної задачі з нелінійними обмеженнями. Використання нелінійних обмежень дозволяє оптимізувати цільову функцію із врахуванням небезпек штормового плавання: гармонійного та параметричного резонансу, втрати остійності на попутному хвилюванні, ударів групових хвиль у корму судна, перевищення допустимих навантажень на конструкцію корпусу судна, тощо. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що вперше вирішена задача автоматичного оптимального керування судном у шторм, що дозволяє суттєво зменшити вплив людського чинника на процеси штормування та підвищити безпеку судноплавства. Отримані результати є відтворюваними та розширюваними. Розширюваність пояснюється врахуванням інших небезпек у вигляді обмежень на оптимізаційні параметри. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у застосуванні методу нелінійної оптимізації з лінійними та нелійними обмеженнями типу нерівностей для знаходження оптимальних і безпечних параметрів штормування. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розроблених методів у модулях автоматичного штормування судна, що дозволяє зменшити вплив людського чинника на процеси штормування, зменшити втомлюваність екіпажу, підвищити безпеку судноплавства.

Ключові слова: навігаційна безпека; людський чинник; інтелектуальні системи транспорту; автоматичне керування; штормові діаграми; оптимізація з обмеженнями; небезпечні зони.

© Mateichuk V., Zinchenko S., Tovstokoryi O.

Статтю прийнято
до редакції 15.11.2023

METHOD OF THE SHIP MAIN ENGINE CONDITION OPERATIONAL DIAGNOSTICS

Polyvoda O. V., Ph.D., Associate Professor, Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University, Ukraine, e-mail: pov81@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6323-3739;

Polyvoda V. V., Ph.D., Associate Professor, Department of Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: polyvodavv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7742-255X;

Simanenkov A. L., Ph.D., Senior Lecturer, Department of Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-5276.

The article is devoted to solving the problem of improving the quality of operational diagnostics of the ship main engine in real time. Modern technical diagnostic systems must perform quick and high-quality identification of increasing malfunctions for the most effective use of monitoring results when solving operational tasks with the issuance of recommendations, which will allow expanding the competence of technical personnel in the decision-making process. Therefore, an important task is the development of mathematical models of time series of measured values of controlled parameters, which will allow to improve the procedure of operational diagnostics due to the detection of the probability of failure of ship engine units before the area of the most intense wear or destruction. In order to improve the existing methods of technical diagnostics of technological equipment, effective operational diagnostics algorithms have been developed, which are implemented in software modules and fully take into account technical and economic requirements, stochastic nature of external influences. When building the operational diagnostics algorithms, the specifics of the processes taking place in the ship main engine were taken into account, modern techniques and methods of mathematical modeling and information theory were used. On the basis of the values obtained as a result of measurements of the controlled parameters of the ship main engine, autoregressive models of the moving average were selected, which describe the obtained time series as accurately as possible. The parameters of the autoregression models were identified using the method of least squares. A method of operational diagnostics based on the determination of spectral entropy and the procedure of logical-time processing is proposed. On the basis of the developed mathematical models and the proposed diagnostic method, an automated system of operational diagnostics of the state of the ship main engine has been developed, which allows timely detection of critical modes of operation of technological equipment in real time.

Key words: ship main engine; diagnostics; monitoring; identification.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.133–143

Introduction. In the process of developing ship diagnostic and monitoring systems, complex automation of equipment is increasingly being used with an increase in the degree of operational computer processing of information [1]. The improvement of information processing methods in systems for monitoring and diagnosing the condition of technical equipment is caused by an increase in the number of monitored parameters, stricter requirements for maintaining optimal operating modes, and the development of methods for operational diagnostics and forecasting of equipment condition. Since the ship main engine, as a complex control object, consists of a certain set of components and systems, the technical condition of each component is determined by a group of diagnostic parameters [2].

Statement of the problem. The fundamental task of the ship main engine condition operational diagnostics is to compare the current technical condition with some reference (completely normal, corresponding to the nominal passport characteristics) condition to support decision-making [3] by technical personnel about the admissibility of further operation of the object.

Operational technical diagnostics are carried out without any dismantling (disassembly) of the object and consist in the systematic determination of all parameters characterizing the operating mode, external conditions, fuel and oils used, the flow of the work process, the technical condition of working components and parts as well as the functioning of service systems [4]. Therefore, an important task is the development of methods, models, algorithms and software modules of

operational diagnostics, versatile and applicable to any complex technical object, which will allow to detect a malfunction in a minimum time interval. Considering the above, the mathematical formulation of the problem of technical diagnostics can be written in the form

$$\Delta t = t_f - t_d \rightarrow \min, \quad (1)$$

where Δt – the time interval required to identify a malfunction of a technical object, t_f – fault occurrence timestamp, t_d – fault detection timestamp.

Analysis of the recent research and publications. A modern monitoring system for the ship main engine is designed as a single hardware and software complex that analyzes parameters and partially calculates the work process in real time. The most well-known modern systems of this type are:

1. KONGSBERG Engine monitoring systems [5]. KONGSBERG Engine Monitoring Systems consist of bearing monitoring components covering Bearing Wear, Water in Oil, Temperature of all bearings and additional measuring points such as Cylinder liner and exhaust gas temperature. Software & system components are common with the K-Chief 600 marine automation system and the AutoChief 600 propulsion control system, allowing integration and joined support.

2. MAN Energy Solutions SaCoS 5000 engine control system [6] – is the evolution of the well-known SaCoSone control system with proven reliability, robustness, tailored functionality for the demands of MAN Energy Solutions engines and extended safety features.

3. Praxis Automation Technology B. V. engine control system Mega-Guard ECS [7]. This Monitoring & Control system is an independent programmable system that monitors the operational parameters of the diesel engine and automates the diesel engine operations. The Monitoring & Control System main functions are: backup safety shutdown; monitoring and alarming of potential harmful or dangerous engine parameters; load (rpm) reduction request in case of engine overload or deviation from normal running conditions; low temperature cooling water thermostat control; self-diagnostics and sensor diagnostics; pre-lube oil pump control.

4. Wärtsilä Engine Control System WECS–9520 has been specially designed for two-stroke engines with Wärtsilä Common Rail technology, covering all engine-related and cylinder-related control functions [8]. Fig. 1 is a schematic representation of the related components and their interconnections. Main components of WECS–9520:

- Control box E90 (SIB) as communication to the external systems, containing a FCM–20 module as 'Online Spare'.
- Per cylinder a control box E95.xx, containing a FCM–20 module each for engine and cylinder-related control functions.

All modules are connected by the system bus. All control boxes (E90, E95.xx) are arranged on the rail unit, and power supply box (E85) is placed nearby the engine.

Engine-related control functions:

- Fuel rail pressure
- Servo oil pressure for exhaust valve drive.

All engine-related control functions are distributed within six FCM–20 modules (cylinders 1–6). For safety reasons all important functions, input and output signals of the modules are redundant. The engine remains in operation if one module fails. The power supply is also redundant. A defective module could be replaced with the 'Online Spare' module. The control box E90 must subsequently be completed with a new module as 'Online Spare' which will receive a download of all application data.

Cylinder-related control functions:

- Volumetric injection control
- Exhaust valve control
- Starting valve control
- Crank angle sensor.

Every cylinder is equipped with an FCM–20 module. A redundant CANOpen bus provides communication between the FCM–20 modules (system bus). The FCM–20 modules receive the crank angle signal via a redundant SSI bus. If a FCM–20 module breaks down, the respective cylinder is cut out. The other FCM–20 modules remain in operation.

The 'Common Function' to the external systems is ensured by data buses to the propulsion control system and to the ship alarm and monitoring system. They serve as interface between operator and engine control.

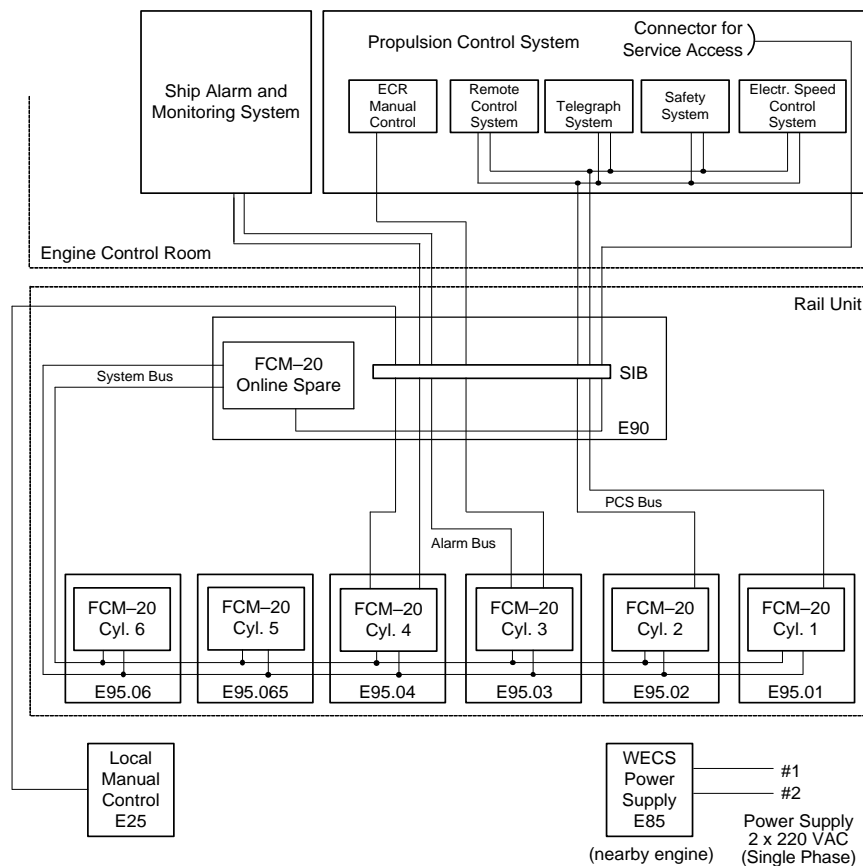


Figure 1 – Wärtsilä Engine Control System WECS–9520 structural scheme

The disadvantages of the considered systems are the averaging of the measurement results of the operating parameters of the ship main engine, which leads to the loss of the most informative part of the diagnostic information that must be used in the decision-making process by technical personnel.

The aim of the research is to develop a method of the ship main engine condition operational diagnostics using the logic-time processing of the measurement signals of the controlled parameters based on the entropy approach for high-quality identification of increasing faults in real time and the most effective use of monitoring results to solve operational problems with the production of recommendations, which will expand the competence of technical personnel in the decision-making process.

Main part. To improve the method of operational diagnostics, an analysis of the operating parameters of the Wärtsilä RT-flex50-B ship main engine was carried out, characterizing the operating mode, external conditions, fuel and oils used, and the flow of the working process.

The ship main engine was considered as a complex technical system. Its working processes in each cylinder are subject to random disturbances, which requires the use of time series processing methods, mathematical statistics, information theory and the theory of random processes to describe them. Figure 2 shows the surfaces of the measured cylinder-related controlled parameters depending on the cylinder number (Cyl. #) and the measured value number (Mes. #) in the time series.

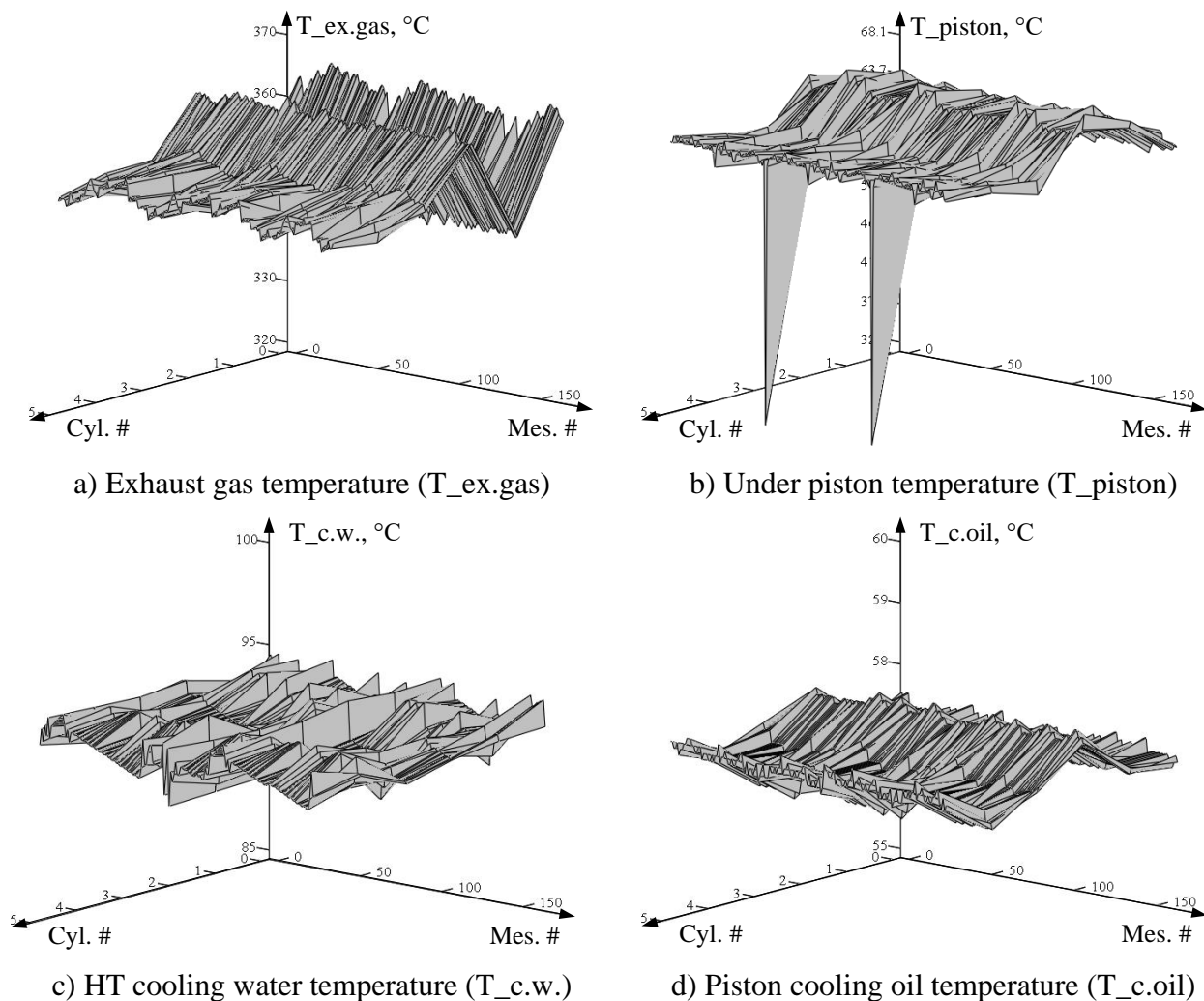


Figure 2 – Surfaces of cylinder-related controlled parameters

It is advisable to construct mathematical models of the controlled parameters dynamics for use in the process of technical object condition diagnostics with help of time series regression analysis methods [9].

The autoregressive model is based on the assumption that the value of a process $y[k]$ depends linearly on a certain number of previous values of the same process $y[k-1], \dots, y[k-n]$.

To achieve greater accuracy in identifying the controlled parameter, it is advisable to combine autoregression and moving average in one model [10]. Then the analyzed time series of controlled parameters can be presented in the form of a model:

$$y[k] = a_0 y[k-1] + a_1 y[k-2] + a_2 y[k-3] + \dots + a_{n-1} y[k-n]. \quad (2)$$

To identify the parameters of model (2), the least squares method can be used. From the experimentally measured data it was obtained:

$$\vec{Y} = X\vec{a}, \quad (3)$$

where $\vec{Y} = [y[n+1] \ y[n+2] \ \dots \ y[N]]^T$ are the elements of the time series starting from $n+1$ order.

The vector of model parameters is determined according to:

$$\vec{a} = [X^T X]^{-1} X^T \vec{Y}, \quad (4)$$

where matrix X is a matrix of input factors, which is formed from elements of a time series:

$$X = \begin{bmatrix} y[n] & y[n-1] & \dots & y[1] \\ y[n+1] & y[n] & \dots & y[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y[N] & y[N-1] & \dots & y[N-n] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

As a result of calculations according to formulas (2) – (5), mathematical models of the controlled parameters for each of the 6 cylinders were obtained. For example, in Fig. 3 shows a graphical representation of the measured parameters (dots) and the predicted parameters according to the obtained mathematical models (solid line) for cylinder #1.

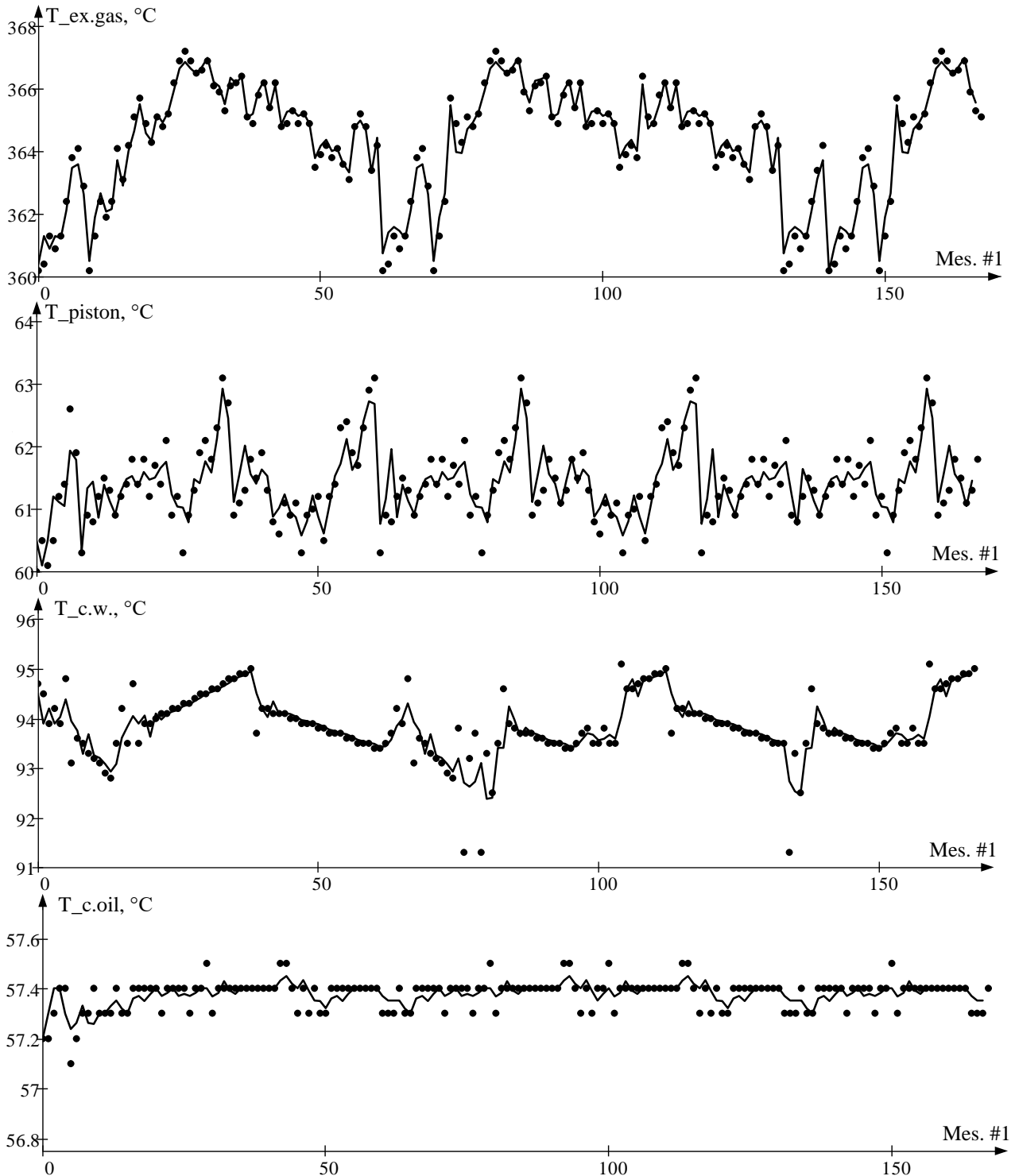


Figure 3 – The measured parameters (dots) and the predicted parameters (solid line) for cylinder #1.

As a result of processing the values of controlled parameters, model coefficients of 5th order were obtained. On the basis of the obtained parameter vectors \vec{a} for each of the 6 cylinders, matrices of mathematical models of the corresponding controlled parameters were formed: $A_{T_{\text{ex.gas}}}$ – for exhaust gas temperature, $A_{T_{\text{piston}}}$ for under piston temperature, $A_{T_{\text{c.w.}}}$ – for HT cooling water temperature, $A_{T_{\text{c.oil}}}$ – for piston cooling oil temperature. The obtained matrices have the form:

$$\begin{aligned}
 A_{T_{\text{ex.gas}}} &= \begin{bmatrix} 0.895 & 0.533 & 0.645 & 0.631 & 0.724 & 0.784 \\ -0.11 & 0.1 & 0.178 & 0.256 & 0.233 & 0.124 \\ 0.08 & 0.1 & -0.028 & 0.142 & 0.162 & 0.015 \\ -0.04 & 0.026 & 0.139 & -0.05 & -0.169 & -0.117 \\ 0.174 & 0.241 & 0.067 & 0.022 & 0.05 & 0.194 \end{bmatrix}, \\
 A_{T_{\text{piston}}} &= \begin{bmatrix} 0.725 & 0.516 & 0.325 & 0.679 & 0.462 & 0.235 \\ 0.092 & 0.275 & 0.14 & 0.064 & 0.134 & 0.209 \\ -0.256 & -0.042 & 0.016 & 0.063 & 0.054 & 0.191 \\ 0.433 & 0.094 & 0.383 & 0.298 & 0.17 & 0.211 \\ 0.007 & 0.158 & 0.137 & -0.105 & 0.18 & 0.154 \end{bmatrix}, \\
 A_{T_{\text{c.w.}}} &= \begin{bmatrix} 0.358 & 0.364 & 0.43 & 0.127 & 0.49 & 0.336 \\ 0.41 & 0.474 & 0.345 & 0.411 & 0.301 & 0.306 \\ 0.274 & 0.137 & 0.153 & 0.329 & 0.198 & 0.392 \\ -0.157 & -0.06 & -0.077 & 0.085 & -0.007 & -0.081 \\ 0.116 & 0.084 & 0.149 & 0.048 & 0.018 & 0.047 \end{bmatrix}, \\
 A_{T_{\text{c.oil}}} &= \begin{bmatrix} 0.455 & 0.301 & 0.647 & 0.836 & 0.741 & 0.356 \\ 0.008 & 0.187 & -0.137 & -0.088 & -0.099 & 0.138 \\ 0.123 & 0.002 & 0.319 & 0.257 & 0.36 & 0.179 \\ 0.172 & 0.298 & -0.003 & -0.077 & 0.015 & 0.308 \\ 0.243 & 0.211 & 0.174 & 0.072 & -0.017 & 0.019 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

The adequacy validation check of the obtained mathematical models was carried out using the root mean square error of recovery of the predicted time series according to the formula

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N y_{oi}^2}}, \tag{7}$$

where N is the number of readings, y_{oi} are the actual normalized values of the time series, and y_{mi} are predicted values, $i = \overline{1, N}$.

The values obtained as a result of sigma calculations according to formula (7) belong to the range $(3...5) \cdot 10^{-3}$, which satisfies the accuracy requirements.

The next important task is the development of an algorithm for the diagnosis of the ship main engine based on the assessment of the normalized energy spectrum of the measured signals and spectral entropy. Diagnostics based on spectral entropy consists of a sequence of the following stages [11–13].

A spectrum is calculated for each s -th segment of length ΔN as

$$Y_s(k) = \sum_{n=0}^{\Delta N-1} y_s(n) e^{-j(2\pi/\Delta N)nk}, k \in \overline{0, \Delta N-1}, s \in \overline{1, N/\Delta N}. \quad (8)$$

The normalized energy spectrum is calculated according to the formula

$$\|W_s(k)\| = \frac{W_s(k)}{\sum_{m=0}^{\Delta N-1} W_s(m)}, \text{ where } W_s(k) = |Y_s(k)|^2. \quad (9)$$

A rule is used to suppress narrow-band noise and wide-band white noise

$$\|W_s(k)\| = 0, \text{ if } \delta_1 < \|W_s(k)\| < \delta_2. \quad (10)$$

Then the spectral entropy is calculated:

$$H_s = \sum_{k=0}^{\Delta N-1} \|W_s(k)\| \lg \|W_s(k)\|. \quad (11)$$

Filtering is carried out according to the algorithm of median smoothing of the sequence H_1, \dots, H_L , $L = N/\Delta N$, and the sequence of entropy estimates $\tilde{H}_1, \dots, \tilde{H}_L$ is obtained.

An adaptive threshold is calculated in the form

$$\gamma = \left(\frac{\max \tilde{H}_s + \min \tilde{H}_s}{2} \right) \mu, \quad (12)$$

where μ is a parameter determined experimentally.

If $\gamma > \tilde{H}_s$, then the segment of the signal is considered normal, where there are no deviations of the controlled parameters from the nominal values ($P = 1$). If $\gamma < \tilde{H}_s$, then the segment of the signal is considered abnormal, where there are deviations of the controlled parameters from the nominal values ($P = 0$).

The results of the proposed diagnostic method without deviations from the nominal values of the controlled parameters are shown in Fig. 4, and in the case of deviations – in Fig. 5.

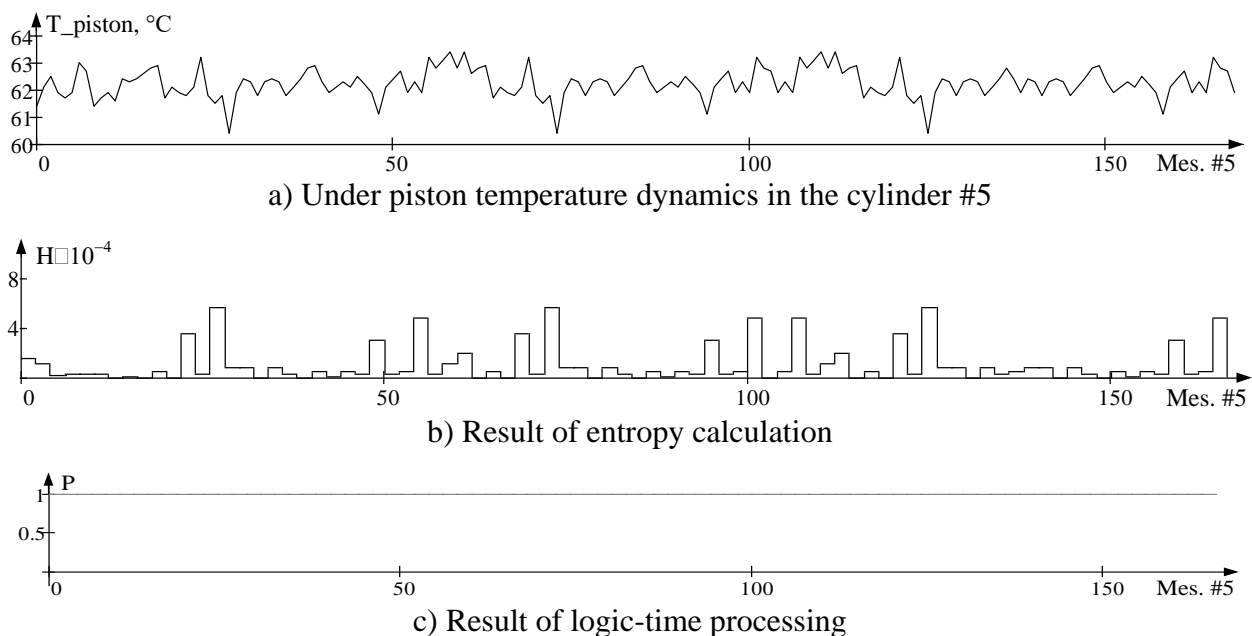
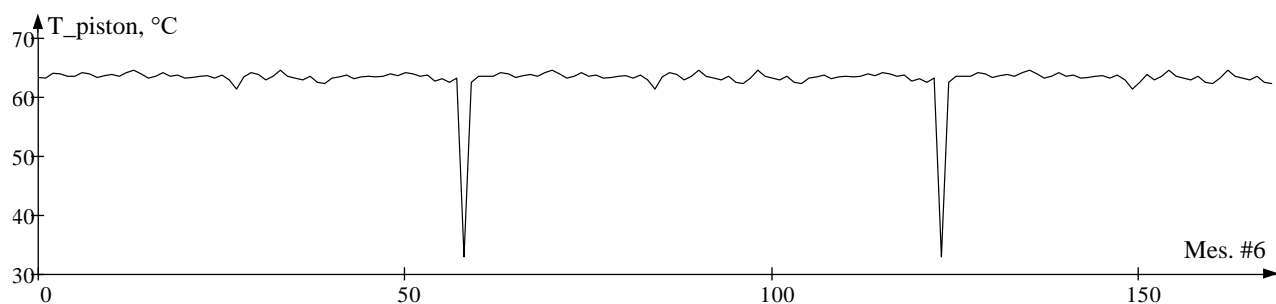
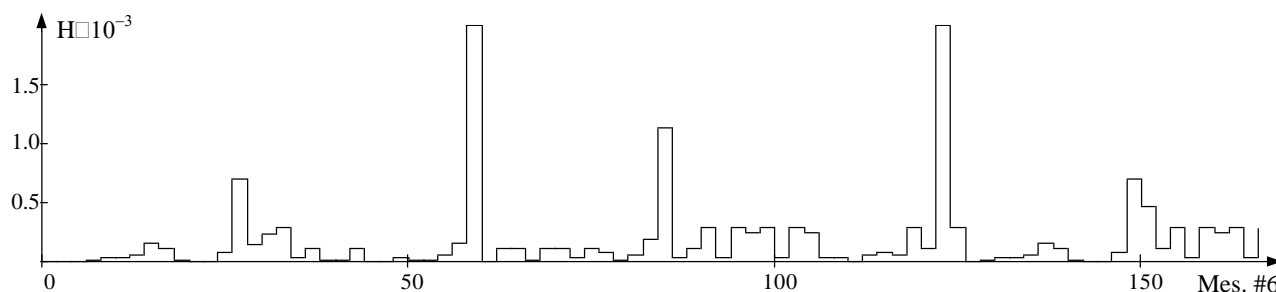


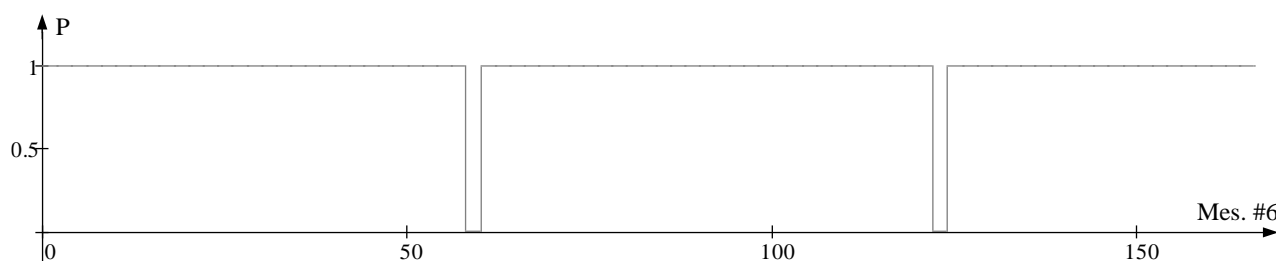
Figure 4 – The results of the diagnostic method without deviations



a) Under piston temperature dynamics in the cylinder #6



b) Result of entropy calculation



c) Result of logic-time processing

Figure 5 – The results of the diagnostic method with deviations

On the basis of the developed mathematical models and the proposed diagnostic method, a structural diagram of the automated system of operational diagnostics of the condition of the ship main engine was designed, shown in fig. 6. The technical condition of each node of the ship main engine is determined by a group of diagnostic parameters. The structure of the operational diagnostics system includes: a database, modules for building mathematical models of monitored parameters with adequacy verification, an interactive interface for interaction with the technical personnel. The database [14] is formed from arrays of numerous values of controlled parameters. The Problem Symptoms Identification Subsystem estimates the current state of the monitored parameters. The result of the analysis is issued by the device in the form of a signal about the normal or abnormal technical condition of the engine.

The implementation of the operational diagnostics system based on the developed mathematical models and the proposed diagnostic algorithm, based on the methods of determining spectral entropy and logical-time processing, allows to formalize the procedures of information support of the technical personnel (Decision Maker) in the assessment of the technical condition of the ship main engine according to controlled parameters.

The implementation of the diagnostic algorithm assumes the following conditions: the process of changing the technical state of the object is monotonous; the limit value of the diagnostic parameter should be known; the trend model of the diagnostic parameter should allow extrapolation that is satisfactory in terms of accuracy.

Similar methods and procedures should be applied to all groups of controlled parameters: cooling water, lubricating oil, fuel oil, scavenge air, air, exhaust gas [15].

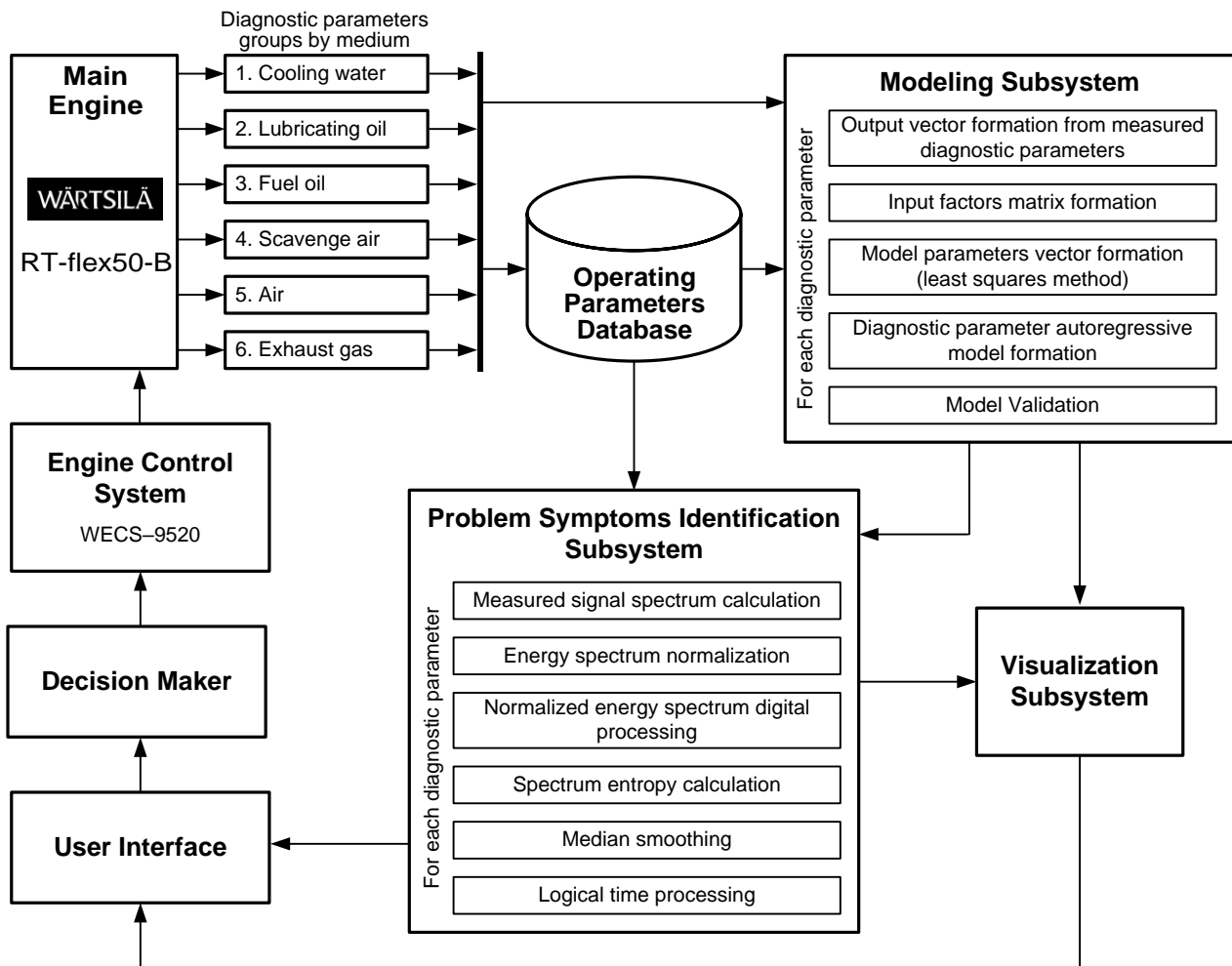


Figure 6 – Structural diagram of the automated system of operational diagnostics

Discussion of results. The resulting autoregression models of the moving average adequately describe the time series corresponding to the measured signals of the controlled parameters for various parts of the ship main engine in various operating modes. The application of the method of digital processing of registered signals opens up the possibility of finding malfunctions in the operation of the equipment and makes it possible to evaluate non-nominal and pre-emergency modes of operation of the engine. Visualization of the values of the controlled parameters in the form of continuous surfaces enables the technical personnel to perform an initial assessment of the operation of the equipment. The conducted studies showed that models of the 4th–5th order adequately describe the dynamics of the controlled parameters.

For further use of the obtained models for processing in software modules of the diagnostics subsystem, it is advisable to present the calculated parameters of the models in the form of matrices for individual parts of the equipment.

The proposed diagnostic method using the entropy approach makes it possible to determine malfunctions of parts of the ship main engine in a time of no more than $2T$, i.e. $\Delta t \leq 2T$, where T is the time interval between measurements of the values of controlled parameters. The monitoring data used in the study were obtained at an average interval of $T = 8$ minutes.

Conducted studies of the application of the entropy approach to the analysis of the characteristic signals of the equipment showed the dependence of the obtained results on the adjustment of signal processing parameters, such as: frame length, the value of the adaptive threshold. For different signals of the controlled parameters of the same group, the optimal settings of the parameters retain their values.

Conclusions. In the research, the method of the ship main engine condition operational diagnostics was developed using the logic-time processing of the measurement signals of the

controlled parameters based on the entropy approach. The proposed method of signal analysis using autoregressive moving average for identification of model parameters. On the basis of the developed mathematical models and the proposed diagnostic method, the automated system of operational diagnostics of the condition of the ship main engine was designed, which allows timely detection of critical modes of operation of technological equipment in real time.

Directions for further research. Further research is being expediently carried out in the direction of the implementation of diagnostic and prognostic procedures, which allows to use optimization methods and reserves of the actual technical condition at a qualitatively new level to prevent failures and increase the inter-repair period.

REFERENCES

1. Young-Jin Kang, Yoojeong Noh, Min-Sung Jang, Sunyoung Park, Ju-Tae Kim (2023). Hierarchical level fault detection and diagnosis of ship engine systems. *Expert Systems with Applications*, Volume 213, Part A, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118814>.
2. Charchalis, A. (2011). Diagnostics of vessel power plants. *Journal of KONES*, 2011, 18(2), 41–47.
3. Christian Velasco-Gallego, Iraklis Lazakis (2022). RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery. *Expert Systems with Applications*, Volume 204, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117634>.
4. Daya, A. A., & Lazakis, I. (2022, April). A semi automated model for improving naval vessel system reliability and maintenance data management. In *RINA Autonomous Ships conference 2022* (pp. 1–12).
5. Engine monitoring systems – Kongsberg Maritime. <https://u.to/fpgJIA>.
6. MAN Energy Solutions SaCoS 5000 engine control system. <https://u.to/S5oJIA>.
7. Engine Control System Refit – Praxis Automation Technology. <https://u.to/S88JIA>.
8. Products and solutions for marine applications – Wärtsilä. <https://www.wartsila.com/>.
9. Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, V. (2018). Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLoS ONE*, 13(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194889>.
10. Kondratieva, I. U., Rudakova, H. V. and Polyvoda, O. V., (2018). "Using Acoustic Methods for Monitoring the Operating Modes of the Electric Drive in Mobile Objects," *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kiev, Ukraine, 2018, pp. 218–221. <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576296>.
11. Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., Lebedenko, Y. (2019). Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. In: *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1020. Springer, Cham, pp 97–109. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7.
12. Kondratieva, I. U., Rudakova, H. V., Polyvoda, O. V., Lebedenko, Yu. O., Polyvoda, V. V. (2019). Using entropy estimation to detect moving objects. *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development*, October 22–24, 2019, Kyiv, Ukraine Proceedings, P. 270–273. <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943839>.
13. Rudakova, H., Polyvoda, O., Kondratieva, I., Polyvoda, V., Rudakova, A., Rozov, Y. (2022). Research of Acoustic Signals Digital Processing Methods Application Efficiency for the Electromechanical System Functional Diagnostics. In: *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 77. pp 349-366. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_23.
14. Lenard, B., Pershey, E., Nault, Z., Rasin, A. (2023). An Approach for Efficient Processing of Machine Operational Data. In: *Database and Expert Systems Applications. DEXA*

2023. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 14146. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39847-6_9.

15. Pająk, M., Kluczyk, M., Muślewski, Ł., Lisjak, D., Kolar, D. (2023). Ship Diesel Engine Fault Diagnosis Using Data Science and SVM Classifier. In: *Advances in Technical Diagnostics II. ICTD 2022. Applied Condition Monitoring*, vol 21. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31719-4_1.

Поливода О. В., Поливода В. В., Сіманенков А. Л. МЕТОД ОПЕРАТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ГОЛОВНОГО СУДНОВОГО ДВИГУНА

Стаття присвячена вирішенню проблеми підвищення якості оперативної діагностики головного суднового двигуна в режимі реального часу. Сучасні системи технічної діагностики повинні виконувати швидку та якісну ідентифікацію наростаючих несправностей для найбільш ефективного використання результатів моніторингу при вирішенні експлуатаційних завдань з видачею рекомендацій, що дозволить розширити компетентність технічного персоналу у процесі прийняття рішень. Тому актуальною задачею є розробка математичних моделей часових рядів вимірних значень контрольованих параметрів, які дозволять вдосконалити процедуру оперативної діагностики завдяки виявленню ймовірності відмови вузлів суднового двигуна раніше області найбільш інтенсивного зносу або руйнування. З метою покращення існуючих методів технічної діагностики технологічного обладнання розроблено ефективні алгоритми оперативного діагностування, що реалізовані у програмних модулях і в повній мірі враховують технічні та економічні вимоги, стохастичний характер зовнішніх впливів. При побудові алгоритмів оперативної діагностики враховано специфіку процесів, що відбуваються в головному судновому двигуні, використано сучасні прийоми і методи математичного моделювання та теорії інформації. На базі значень, отриманих у результаті вимірювань контрольованих параметрів головного суднового двигуна були обрані авторегресійні моделі ковзного середнього, які максимально точно описують отримані часові ряди. Параметри моделей авторегресії були ідентифіковані за допомогою методу найменших квадратів. Запропоновано метод оперативної діагностики, що заснований на визначенні спектральної ентропії і процедурі логіко-часової обробки. На основі розроблених математичних моделей і запропонованого методу діагностики розроблено автоматизовану систему оперативної діагностики стану головного суднового двигуна, яка дозволяє здійснювати своєчасне виявлення критичних режимів роботи технологічного обладнання в режимі реального часу.

Ключові слова: головний судновий двигун; діагностика; моніторинг; ідентифікація.

© Polyvoda O. V., Polyvoda V. V., Simanenkov A. L.

Статтю прийнято
до редакції 26.10.2023

UDC 004.58:004.8

METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF QUALIFICATION PARAMETERS FOR MARINE OPERATORS UNDER RISK CONDITIONS

Ponomaryova Victoria, Graduate student, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: yikkiivan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9660-1772;

Nosov Pavlo, Ph.D., Associate Professor, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

The objective of the study is to enhance maritime safety by applying a method for identifying and predicting the qualification parameters of ship operators based on fuzzy logic. The core challenge of this research lies in the necessity to control internal uncertainty factors of ship operator actions and develop a system that identifies their qualification parameters to ensure safe decision-making in complex navigational conditions.

The research methodology comprises: a) an algorithm for automatic data processing of ECDIS to reduce subjectivity in defining fuzzy membership functions related to navigational factors; b) formalization of the structure of fuzzy functions and establishment of a rule base for identifying risks in complex navigation scenarios; and c) simulation-based fuzzy modeling that investigates the influence of qualification parameters on the overall risk index of ship motion management.

The research outcomes involve the development of an intelligent system predicting navigational risks in intricate maritime conditions. Through simulation modeling, it has been identified that ship operators' qualification parameters significantly impact the risk associated with vessel management. For instance, an increase in parameters across four indicators can elevate the overall risk by 15.8%, shifting the situation into a hazardous or critical category.

The practical significance is manifested by the efficiency of automated ECDIS data processing, which reduced subjective errors and refined navigational risk prediction. The revealed influence of ship operators' qualification parameters on risk levels underscores the importance of individualized forecasts tailored to each operator. The practical value also lies in the potential to enhance maritime safety by precise risk prediction and management, considering the human factor of each operator. Future research will focus on integrating this method into other ship motion management systems, creating even more effective decision-support tools for operators under conditions of inherent uncertainty. Bibl. 23 fig. 19.

Key words: automation; organizational-technical systems; risk; intelligent systems; qualification parameters; identification; fuzzy logic; uncertainty.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.144–165

Introduction. In recent years, technologies based on artificial intelligence are increasingly being integrated into the management tasks of marine vessels in challenging navigational conditions. Neural network models are employed for predicting optimal maneuvering trajectories, computer vision systems for recognizing surrounding objects and determining their dynamics, as well as machine learning algorithms for analyzing meteorological conditions and automatically adjusting the ship's course. These innovations substantially enhance the safety and efficiency of maritime transport, especially in areas that are complex and hazardous for navigation [1–3].

Despite evident progress in this direction, the use of intelligent systems in various maritime transport tasks, and the emergence of e-navigation, in the vast majority of water transport, the decision to manage the vessel is made by the ship operator [4]. Navigational instruments, sensors, and devices provide the information upon which managerial decisions are made, carrying full responsibility for their consequences, regardless of the complexity and criticality of the situation [5]. Despite the high rate of disasters attributed to human error, over 70%, intelligent, automated, and automatic systems for trajectory forecasting, decision-making support, and optimal management cannot cover the full spectrum of navigational situations and mitigate the human factor throughout the ship's journey [6]. However, at the same time, the significance of the aforementioned information systems for navigational safety is quite substantial, as noted in several leading studies in this field [7–9].

Consequently, a contradiction arises between two concepts: the control over the situation by the ship operator-navigator and the comprehensive information systems for situational identification and vessel management. Distinguishing between these two concepts seems unfeasible due to the

instability of the projected safety level as their primary objective function. While artificial information systems have clear algorithms and can be analyzed through computer simulation under given conditions and constraints, human decision-making processes are based on complexly formalized processes of intellectual activity of the operator as a subject.

Problem Statement. The above discussion highlights the evident complexity in delineating functions between the operator and the ship's information management systems. Indeed, the time it takes to transition from manual ship control during complex, non-standard maneuvers, considering various factors, will vary among operators [10]. At a given moment, each operator, while performing their functional duties, has a confidence level that varies relative to their colleagues and depends on the structural parameters of their qualifications. It is precisely the set of qualification parameters that influences the performance of specific ship management tasks in relation to conditions and factors defining the navigational situation.

It should be noted that in critical situations, where the operator's decision-making time is minimal and the body is under stress, the processes of restoring qualification parameters are severely hampered, leading to catastrophic outcomes [11].

The article [12] is concerned with the concept of human operators remotely controlling autonomous ships, with particular focus on the design of Remote Operation Centres (ROC) and the human factors involved in such operations. It discusses the role of automation in maritime navigation and the challenges of keeping a human 'in the loop' for decision making. Several tasks within a ROC are outlined, including managing the out-of-the-loop syndrome, ensuring proper automatic control, and providing manual control when necessary. Additionally, the paper covers tasks specific to maritime navigation like anti-grounding and anti-collision tasks and the design considerations for effective and safe operation in these domains.

Key points covered in the article include: Discussion of “out-of-loop syndrome,” where operators may be unaware of the situation due to over-reliance on automation. The importance of taking into account the appropriate qualification parameters for performing complex maneuvers is indicated, but the algorithm for ensuring such a parameter is not shown.

The paper [13] analyzes the work of maritime officers using the Operator Function Model (OFM) and examines recent ship accidents along the Korean coast. Introduced the concept of the Operator Function Model (OFM), which is used to characterize worker activity in complex systems, such as the operation of a ship. The analyzes specific OFM of ship navigation to evaluate cognitive demands and technological innovations in ship navigation. The text discusses specific types of errors, such as voyage planning errors, and mentions an example of a ship accident involving the Kumho Ferry No. 3. It seems to discuss the incident as an example of failure in appropriately identifying and responding to AtoN signals, resulting in a grounding accident. An important point is the creation of a model of the navigator's behavior, but the principles of its application in real time during a navigational watch are not specified.

The research article [14] presented in the screenshots deals with the enhancement of video-based detection infrastructure for automated ship recognition and behavior analysis. Also discusses the complexities in the interaction between human operators and the ship's information management systems, especially during complex and non-standard maneuvers. It highlights the variability in the operators' confidence levels and the influence of their qualifications on the management of the ship, especially in critical situations where decision-making time is short, and stress levels are high. The research aims to improve the immediate and understandable on-site traffic situation awareness for operators, potentially impacting their confidence in the system's data. The article's methodology involves manual rectification of training images and interpretation of YOLO model outputs, which could be seen as analogous to the need for skilled operators to interpret and act upon complex information from automated systems in real time.

The framework proposed in the article aims to provide high-fidelity, immediate maritime traffic information, which could be crucial in high-stress situations where operators have minimal time to make decisions. Accurate and efficient automated recognition systems can potentially reduce the cognitive load on human operators, thus mitigating the risk of catastrophic outcomes due

to delayed or incorrect human responses. The automated system's ability to recognize and analyze ship behavior consistently and accurately, even in varied maritime conditions, relates directly to the concerns about restoring qualification parameters under stress.

However, the study does not assume a prediction of the perception of the navigation situation, taking into account the specifics of the individual model of the navigator, which requires improvement in this part.

The article [15], discusses the complexity of delineating functions between the operator and the ship's information management systems, emphasizing the influence of operator qualifications and the difficulty in maintaining performance under stress during critical situations.

With more accurate models, the system could potentially reduce the cognitive load on human operators by providing more reliable predictions of ship behavior. By training with models that closely mimic real-world behavior, operators can develop better skills and confidence.

Just like in previous studies, the importance of maintaining the navigator's qualifications at a high level with the help of automated systems is emphasized. However, no method is specified to take into account multifactorial skill levels to assess possible risks based on incomplete data.

The article [16] discusses the complexity of delineating functions between the operator and the ship's information management systems, emphasizing the influence of operator qualifications and the difficulty in maintaining performance under stress during critical situations. Accurate ship response models could help in creating simulations and training programs that prepare operators for high-stress situations. By training with models that closely mimic real-world behavior, operators can develop better skills and confidence. The optimization of these parameters in simulations, as mentioned in the research, could enhance the training and qualifications of operators. At the same time, approaches are not indicated that allow the restoration of selected parameters of the navigator's qualifications, especially in real time conditions.

Consequently, there arises a clear need to control the internal uncertainty factors related to the operator's actions, which is a current challenge. The creation of an automated control system for safe decision-making by the operator will allow for forecasting, in the early stages of a ship's route, how adequate their qualification parameters are for performing tasks under specific conditions.

However, the challenges of creating systems that identify the qualification parameters of ship operators are significant. These challenges manifest in several categories:

1. **Subjectivity of the Human Factor:** The human decision-making process is difficult to formalize. It relies on intuition, experience, and other implicit factors, making it unpredictable and distinct from AI algorithms. Additionally, individual differences among operators should be taken into account: varying levels of confidence and qualification parameters can lead to different response speeds and problem-solving algorithms.

2. **Human-Machine Interaction with Navigation and Ship Management Systems:** The contradiction between manual and automatic control can lead to operator errors, especially during critical moments. Challenges also arise in determining where exactly automated system control should start and end, and where human operator control should take over. Improper delineation can result in errors and misunderstandings.

3. **Determination of Qualification Parameters:** The difficulty in defining and measuring the qualification parameters of operators can lead to inaccuracies in forecasting and ship movement control. This suggests that continuous updating of operator qualifications is essential for accurate control and forecasting, which can be a complex task in the dynamic environment of ship management.

4. **Technological Constraints:** At the current stage of automated and intelligent technology development, there are challenges in designing advanced tools for accurate and timely analysis of all necessary parameters.

The above points underscore that the stated problem is non-trivial, objectively exists, and requires solutions through the development of specialized automated and intelligent methods and approaches.

Research Purpose and Objectives. The purpose of this study is to develop a method for identifying the qualification parameters of ship operators in organizational-technical ship management systems using intelligent systems based on fuzzy logic. To address the stated problem, several tasks need to be accomplished:

1. Develop an algorithm for the automated processing of experimental ECDIS navigation data in complex navigation areas with the aim of reducing the subjectivity in determining parameters of fuzzy membership functions concerning navigation factors.

2. Based on the obtained fuzzy membership functions, describe their formal structure and construct a fuzzy rule base for the intelligent system identifying navigation risks while managing a ship under complex (critical) conditions.

3. Conduct simulated fuzzy modeling taking into account the model of the ship operator's qualification parameters. Investigate, based on the acquired experimental data, the influence of qualification parameters on the increase in the overall risk indicator when managing a ship.

Primary Research Material. In accordance with the first research task set, we will develop an algorithm for processing experimental ECDIS navigation data based on software tools for parameters of fuzzy membership functions concerning navigation factors.

To address this task, data was extracted from the TRANSAS simulator system [17] as follows. Authorization was performed in the capacity of an instructor, and from the main system menu, "Tools" was selected followed by the "Logs" section. This allowed access to the "Track History", a key section for analyzing the chronology of the ship's passage. Focusing on our desired time interval, the "Export" function was activated, choosing the CSV format. After saving the data, a detailed check of the exported file (Fig. 1) was carried out to ensure that all necessary data were successfully extracted and are ready for further analysis. Where: LAT – Latitude; LON – Longitude; COG - Course Over Ground - the direction of a vessel's movement relative to the base; SOG - Speed Over Ground - the speed of the vessel relative to the ground; HDG - Heading - the actual course the vessel is on; LOG - Log (or lag) - the distance the vessel has traveled from the start of navigation; SET - Direction of the current; DRIFT - Speed of the current; SPD F - Forward speed or speed by the bow; SPD A - Aggregate speed or speed by the stern.

TIME	LAT	LON	COG	SOG	HDG	LOG	SET	DRIFT	SPD F	SPD A
0	41,25713646	29,15372911	193	3,122	193	3,122	103	0	-0,002	-0,002
5	41,25707015	29,15370873	193	3,126	193	3,126	103	0	0	-0,006
10	41,25700185	29,15368768	193	3,13	193	3,13	103	0	-0,001	-0,006
15	41,25693353	29,15366677	193	3,134	193	3,134	103	0	-0,001	-0,008
20	41,2568652	29,15364579	193	3,139	193	3,139	103	0	0	-0,009
25	41,25679688	29,15362476	193	3,143	193	3,143	103	0	-0,001	-0,01
30	41,25672856	29,15360382	193	3,148	193	3,148	103	0	-0,001	-0,011
35	41,25666024	29,15358285	193	3,152	193	3,152	103	0	0	-0,012
40	41,25659192	29,15356183	193	3,156	193	3,156	103	0	-0,001	-0,013
45	41,25651973	29,15354089	193	3,16	193	3,16	103	0	-0,001	-0,013
50	41,25644615	29,15351991	193	3,164	193	3,164	103	0	-0,001	-0,014
55	41,25637263	29,15349888	193	3,202	193	3,202	103	0	0,009	-0,026
60	41,25629818	29,15347564	193	3,452	193	3,452	103	0	0,039	-0,059
65	41,25621476	29,153451	192	4	194	3,999	103	0,1	0,333	-0,515
70	41,25611476	29,15342222	192	4,92	195	4,909	105	0,3	0,693	-1,36
75	41,255991	29,15338443	193	6,125	199	6,094	108	0,6	0,934	-2,163
80	41,2558408	29,15333135	195	7,324	203	7,267	112	0,9	1,034	-2,859
85	41,25566894	29,15325865	198	8,299	208	8,185	118	1,4	1,269	-4,022
90	41,25548283	29,15315881	204	9,131	215	8,963	124	1,7	1,304	-4,793

Figure 1 – Fragment of data extracted from the ECDIS TRANSAS system

The Bosphorus location was chosen for analysis, which is characterized by specific features of its passage. The qualification indicators of a shipmaster play a critical role in the safe passage through the Bosphorus strait [18]. Experience in navigating ships under complex and restricted

conditions, knowledge of local current features, as well as the ability to make quick decisions under challenging circumstances are essential. A lack of sufficient experience, inadequate preparation, or overestimation of one's abilities by the shipmaster can significantly increase the risks when crossing the strait. Each mistake or delay in decision-making can lead to catastrophic consequences, such as collisions or grounding of the ship, resulting in environmental, economic, and human losses.

Based on the presented data about the ship's speed and course, one can infer that the ship maintained a stable speed for most of the time.

However, there were moments of abrupt deceleration. This may indicate unexpected obstacles or maneuvers needed to avoid collisions. The ship's course also experienced fluctuations, suggesting challenges in navigation due to currents or other ships (Fig. 2).

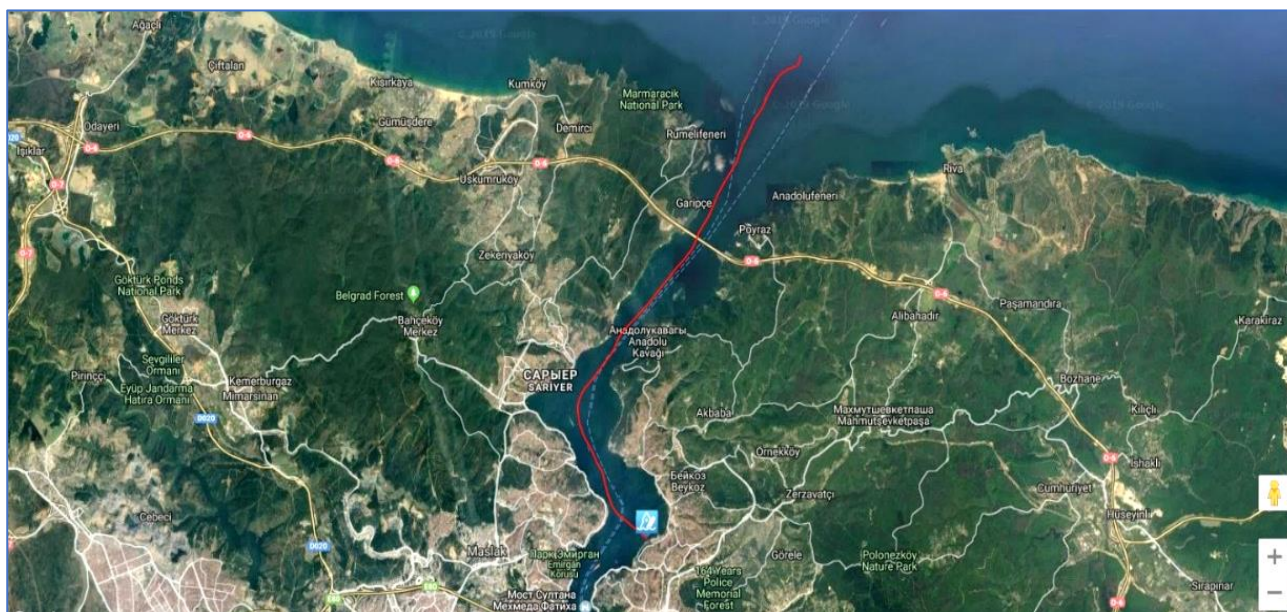


Figure 2 – Ship's trajectory in the Bosphorus location

The analysis of data based on the trajectory and numerical characteristics of the ship's movement allows for the formulation of fuzzy membership functions through automated means. For this purpose, we will develop software for processing numerical navigation data of the route, based on which the corresponding fuzzy membership functions will be constructed.

The program, developed in Python [19] (Fig. 3), analyzes data from a CSV file containing Speed Over Ground (SOG) values. Based on this data, the program performs two primary tasks:

1. Data Categorization: SOG values are divided into various categories such as "Very Slow", "Slow", "Medium", "Fast", "Very Fast", and "Critically Fast". The distribution of these categories is then displayed, and the program generates a bar chart to visualize this distribution.

2. Fuzzy Membership Generation: The program determines the membership functions for each speed category based on trapezoidal functions. These functions illustrate the degree to which each SOG value corresponds to different categories. The program then displays a graph showing the membership functions for each category. Subsequently, the program calculates and displays the degree of membership of each SOG value to each category.

Thus, the program analyzes the speed data and applies fuzzy logic to it for categorization and determination of the degree of membership to various categories. Let's consider a code fragment and the programming result based on the ship's Speed Over Ground (SOG) parameter:

Based on the software code, relevant graphs were generated that illustrate the ship's movement indicators based on its experimental data (Fig. 4).

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz

# The path to the file
path = "C:\\Science\\fuzzy logic_1\\3+.csv"

def plot_category_distribution(data_path):
    # Loading Data
    data = pd.read_csv(data_path, delimiter=',')

    # Extracting SOG value and converting it to number format
    data['SOG'] = data['SOG'].str.replace('.', '').astype(float)

    # Function for SOG categorization
    def categorize_sog(value):
        if 1 <= value <= 3:
            return "Very Slow"
        elif 4 <= value <= 7:
            return "Slow"
        elif 8 <= value <= 12:
            return "Moderate"
        elif 13 <= value <= 16:
            return "Fast"
        elif 17 <= value <= 19:
            return "Very Fast"
        else:
            return "Critically Fast"

    # Applying the categorization function
    data['Category'] = data['SOG'].apply(categorize_sog)

    # Displays the number of posts by category
    print(data['Category'].value_counts())

    # Distribution schedule
    data['Category'].value_counts().plot(kind='bar', color='skyblue')
    plt.title('Distribution of SOG values by category')
    plt.xlabel('Category')
    plt.ylabel('Number of records')
    plt.show()

def generate_fuzzy_membership(data_path):
    # Loading Data
    df = pd.read_csv(data_path, delimiter=";", decimal=",")
    sog = df['SOG'].values

    # Definition of membership functions
    x_sog = np.arange(0, 31, 1) # Speed range

    very_slow = fuzz.trapmf(x_sog, [0, 0, 1, 3])
    slow = fuzz.trapmf(x_sog, [1, 3, 4, 7])
    moderate = fuzz.trapmf(x_sog, [4, 7, 8, 12])
    fast = fuzz.trapmf(x_sog, [8, 12, 13, 16])
    very_fast = fuzz.trapmf(x_sog, [13, 16, 17, 19])
    critical_speed = fuzz.trapmf(x_sog, [17, 19, 20, 30])

    # Вивід графіка
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(x_sog, very_slow, 'b', label='Very Slow')
    plt.plot(x_sog, slow, 'g', label='Slow')
    plt.plot(x_sog, moderate, 'r', label='Moderate')
    plt.plot(x_sog, fast, 'c', label='Fast')
    plt.plot(x_sog, very_fast, 'm', label='Very Fast')
    plt.plot(x_sog, critical_speed, 'y', label='Critically Fast')
    plt.title('Accessory functions for SOG')
    plt.xlabel('Speed (knots)')
    plt.ylabel('Degree of affiliation')
    plt.legend(loc='upper right')
    plt.grid(True)
    plt.show()

    # Printing degree of membership values for each record in a file
    results = {
        'Very Slow': fuzz.interp_membership(x_sog, very_slow, sog),
        'Slow': fuzz.interp_membership(x_sog, slow, sog),
        'Moderate': fuzz.interp_membership(x_sog, moderate, sog),
        'Fast': fuzz.interp_membership(x_sog, fast, sog),
        'Very Fast': fuzz.interp_membership(x_sog, very_fast, sog),
        'Critically Fast': fuzz.interp_membership(x_sog, critical_speed, sog)
    }

    for key, value in results.items():
        print(f"{key}: {value}")

# Calling functions one by one
plot_category_distribution(path)
generate_fuzzy_membership(path)

```

Figure 3 – Software code for processing ECDIS experimental data

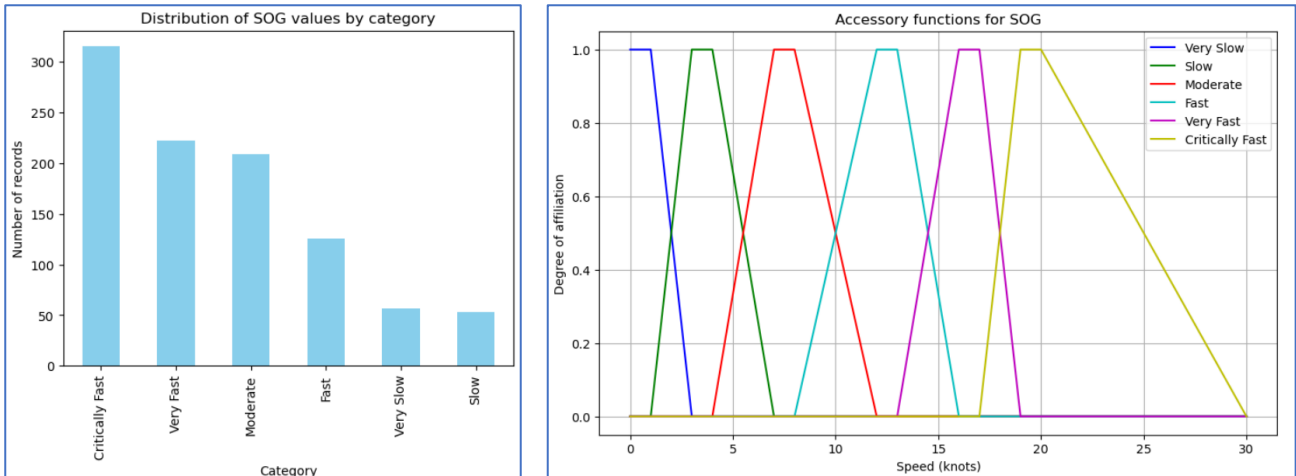


Figure 4 – Graphs of categorization and formulation of membership functions

The graphs depict two results of the program's operation:

1. Distribution of SOG values by categories.

The bar chart shows the distribution of Speed Over Ground (SOG) values across various categories. The "Critically Fast" category has the highest number of entries, making it the most prevalent in the presented data. The next most frequent categories are "Very Fast" and "Fast". The categories "Slow" and "Very Slow" are the least represented in the data.

2. Membership functions for SOG:

The graph displays the trapezoidal membership functions for different speed categories. Each line (color) represents a specific speed category, and their intersections indicate the fuzziness of a speed value's membership to one or another category. For instance, a speed of 5 knots has a

certain degree of membership to the "Slow" and "Medium" categories, as can be seen from the intersection of the green and red lines.

Thus, the first research task has been accomplished, allowing us to proceed to the next steps within the overall objective.

The subsequent challenge is to formally describe the structure of the obtained fuzzy membership functions and to construct a fuzzy rule base for an intelligent system that identifies navigational risks in ship management. For this, types of membership functions [20–22] were analyzed and identified that can best describe a series of the following navigational parameters:

Proximity of oncoming vessels (Fig. 5):

$$\mu_{VFar}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -0,36 \\ \frac{x+0,36}{0,04+0,36} & \text{if } -0,36 < x \leq -0,04 \\ 1, & \text{if } -0,04 < x \leq 0,04 \\ \frac{0,22-x}{0,22-0,04} & \text{if } 0,04 < x \leq 0,22 \\ 0, & \text{if } x > 0,22 \end{cases} ; \mu_{Far}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,1 \\ \frac{x+0,1}{0,16+0,1} & \text{if } 0,1 < x \leq 0,16 \\ 1, & \text{if } 0,16 < x \leq 0,2 ; \\ \frac{0,31-x}{0,31-0,2} & \text{if } 0,2 < x \leq 0,31 \\ 0, & \text{if } x > 0,31 \end{cases}$$

$$\mu_{Moderate}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,23 \\ \frac{x-0,23}{0,28-0,23} & \text{if } 0,23 < x \leq 0,28 \\ 1, & \text{if } 0,28 < x \leq 0,32 ; \\ \frac{0,37-x}{0,37-0,32} & \text{if } 0,32 < x \leq 0,37 \\ 0, & \text{if } x > 0,37 \end{cases} ; \mu_{Close}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,31 \\ \frac{x-0,31}{0,42-0,31} & \text{if } 0,31 < x \leq 0,42 \\ 1, & \text{if } 0,42 < x \leq 0,46 ; \\ \frac{0,62-x}{0,62-0,46} & \text{if } 0,46 < x \leq 0,62 \\ 0, & \text{if } x > 0,62 \end{cases}$$

$$\mu_{VClose}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,45 \\ \frac{x-0,45}{0,59-0,45} & \text{if } 0,45 < x \leq 0,59 \\ 1, & \text{if } 0,59 < x \leq 0,65 ; \\ \frac{0,83-x}{0,83-0,65} & \text{if } 0,65 < x \leq 0,83 \\ 0, & \text{if } x > 0,83 \end{cases} ; \mu_{TClose}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,56 \\ \frac{x-0,56}{0,96-0,56} & \text{if } 0,56 < x \leq 0,96 \\ 1, & \text{if } 0,96 < x \leq 1,06 . \\ \frac{1,46-x}{1,46-1,06} & \text{if } 1,06 < x \leq 1,46 \\ 0, & \text{if } x > 1,46 \end{cases}$$

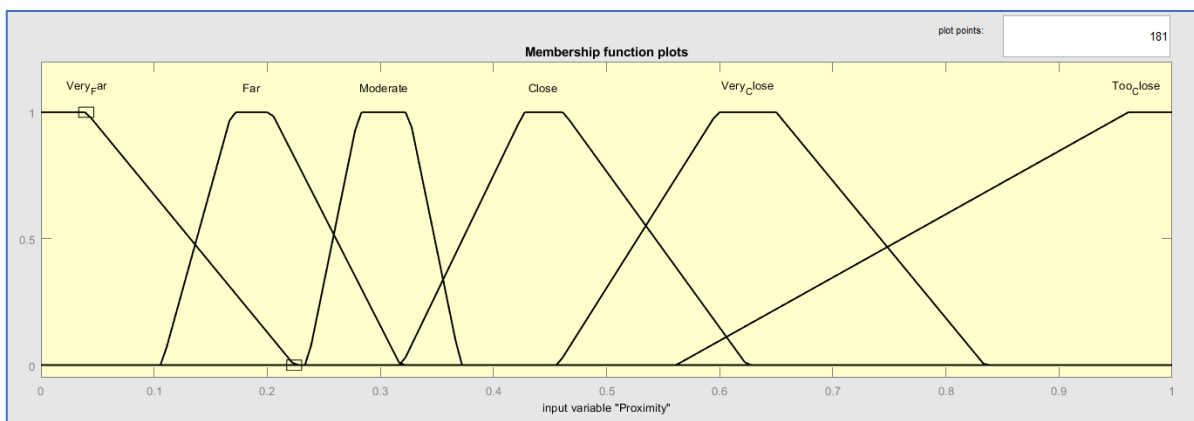


Figure 5 – Membership function: trapmf

2. Technical condition of the vessel (Fig. 6):

$$\mu_{\text{Excellent}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -0,26 \text{ or } x \geq 0,15 \\ \frac{x-0,26}{0,25} & \text{if } -0,26 \leq x < 0,00 \\ 1, & \text{if } 0,00 \leq x < 0,01 \\ \frac{0,15-x}{0,13} & \text{if } 0,01 \leq x \leq 0,15 \end{cases} ; \mu_{\text{Satisfy}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -0,08 \text{ or } x \geq 0,3 \\ \frac{x+0,08}{0,25} & \text{if } -0,08 \leq x < 0,18 \\ 1, & \text{if } 0,18 \leq x < 0,24 \\ \frac{0,35-x}{0,1} & \text{if } 0,24 \leq x \leq 0,35 \end{cases} ;$$

$$\mu_{\text{MinorHD}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,25 \text{ or } x \geq 0,46 \\ \frac{x+0,25}{0,08} & \text{if } 0,25 \leq x < 0,33 \\ 1, & \text{if } 0,33 \leq x < 0,38 \\ \frac{0,47-x}{0,08} & \text{if } 0,38 \leq x \leq 0,47 \end{cases} ; \mu_{\text{MediumD}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,34 \text{ or } x \geq 0,86 \\ \frac{x+0,34}{0,148} & \text{if } 0,345 \leq x < 0,49 \\ 1, & \text{if } 0,49 \leq x < 0,54 \\ \frac{0,86-x}{0,323} & \text{if } 0,54 \leq x \leq 0,86 \end{cases} ;$$

$$\mu_{\text{SevereD}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,61 \text{ or } x \geq 0,9 \\ \frac{x+0,61}{0,2} & \text{if } 0,61 \leq x < 0,81 \\ 1, & \text{if } 0,815 \leq x < 0,817 \\ \frac{0,9-x}{0,09} & \text{if } 0,817 \leq x \leq 0,9 \end{cases} ; \mu_{\text{Critical}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,84 \text{ or } x \geq 1,22 \\ \frac{x-0,84}{0,107} & \text{if } 0,84 \leq x < 0,95 \\ 1, & \text{if } 0,95 \leq x < 1 \\ \frac{0,9-x}{0,09} & \text{if } 1 \leq x \leq 1,22 \end{cases} .$$

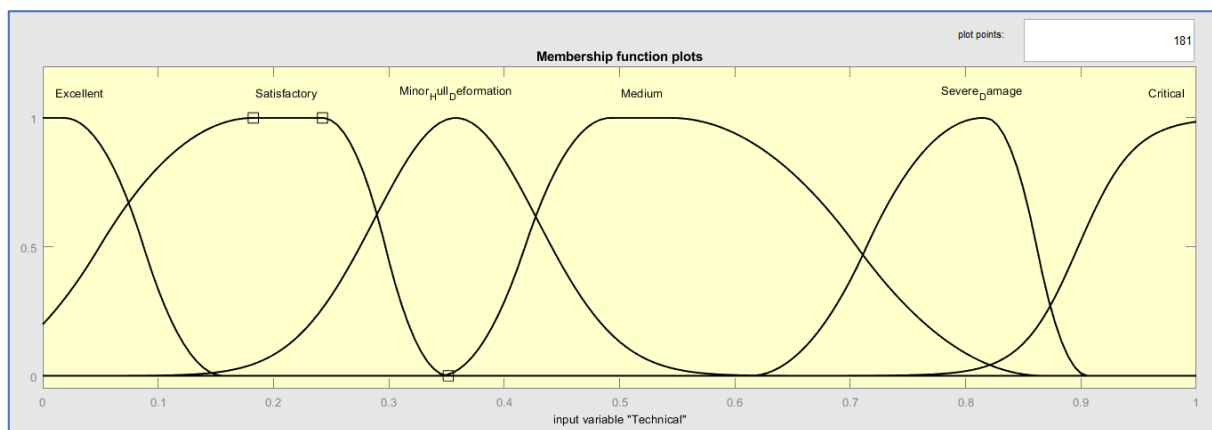


Figure 6 – Membership function: pimf

3. Proximity to dangerous isobaths and separation lines in straits (Fig. 7):

$$\mu_{\text{VeryF}}(x) = e^{-\frac{(x-0,175)^2}{2 \times (-0,026)^2}} ; \mu_{\text{Far}}(x) = e^{-\frac{(x-0,06)^2}{2 \times 0,22^2}} ;$$

$$\mu_{\text{Moderate}}(x) = e^{-\frac{(x-0,04)^2}{2 \times 0,37^2}} ; \mu_{\text{Close}}(x) = e^{-\frac{(x-0,05)^2}{2 \times 0,53^2}} ;$$

$$\mu_{\text{VClose}}(x) = e^{-\frac{(x-0,08)^2}{2 \times 0,7^2}} ; \mu_{\text{TClose}}(x) = e^{-\frac{(x-0,21)^2}{2 \times 1^2}} .$$

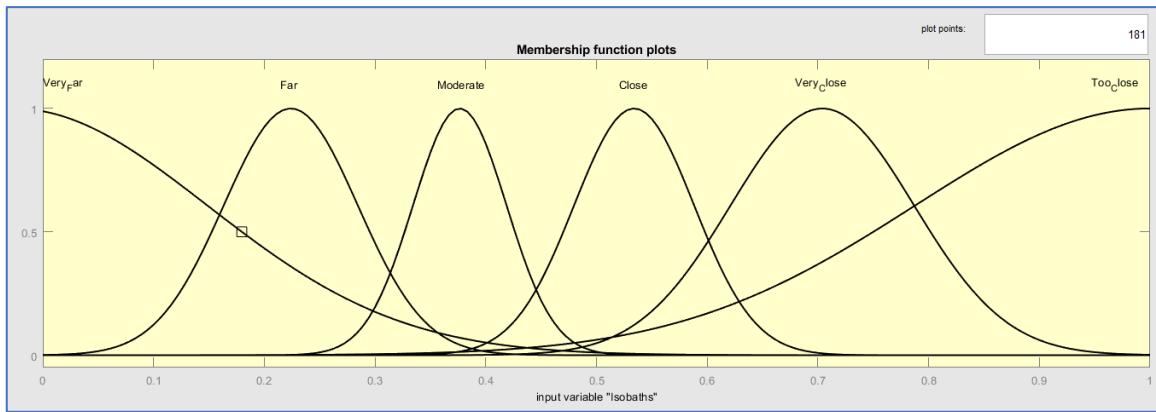


Figure 7 – Membership function: gaussmf

4. Currents (Fig. 8):

$$\mu_{Weak}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x+0,01}{0,06} \right|^{2\frac{1}{3}}}; \quad \mu_{Moderate}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,17}{0,09} \right|^{2\frac{1}{2}}};$$

$$\mu_{Noticeable}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,35}{0,08} \right|^{2\frac{1}{2}}}; \quad \mu_{Strong}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,58}{0,05} \right|^{5\frac{2}{3}}};$$

$$\mu_{VStrong}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,77}{0,05} \right|^{5\frac{2}{3}}}; \quad \mu_{Critical}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-1}{0,1} \right|^{2\frac{1}{2}}}.$$

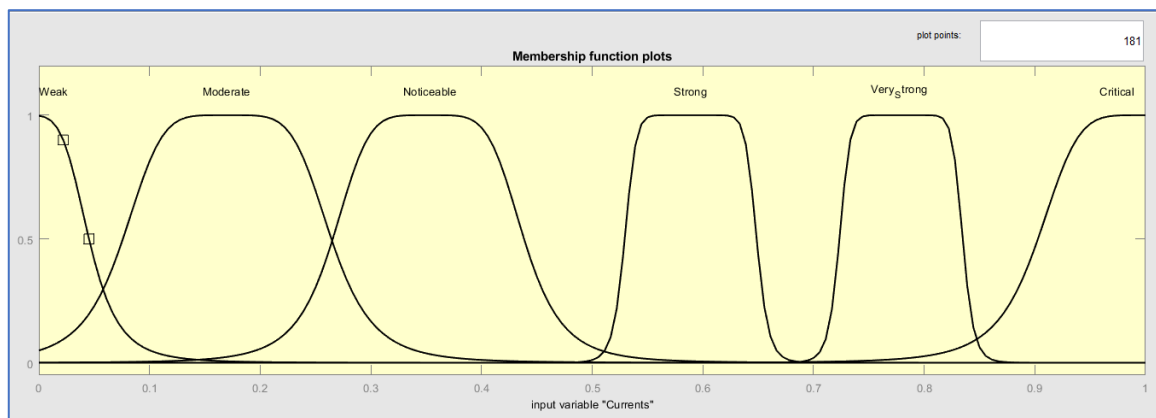


Figure 8 – Membership function: gbellmf

5. Wind (Fig. 9):

$$\mu_{Weak}(x_1) = \frac{x+0,4}{0,4}; \quad \mu_{Weak}(x_2) = \frac{0,12-x}{0,12};$$

$$\mu_{Moderate}(x_1) = \frac{x-0,03}{0,15-0,03}; \quad \mu_{Moderate}(x_2) = \frac{0,26-x}{0,26-0,15};$$

$$\mu_{Noticeable}(x_1) = \frac{x-0,17}{0,31-0,17}; \quad \mu_{Noticeable}(x_2) = \frac{0,45-x}{0,45-0,31};$$

$$\begin{aligned} \mu_{Strong}(x_1) &= \frac{x-0,38}{0,5-0,38}; & \mu_{Strong}(x_2) &= \frac{0,65-x}{0,65-0,5} \\ \mu_{VStrong}(x_1) &= \frac{x-0,57}{0,69-0,57}; & \mu_{VStrong}(x_2) &= \frac{0,82-x}{0,82-0,69} \\ \mu_{Critical}(x_1) &= \frac{x-0,76}{0,93-0,76}; & \mu_{Critical}(x_2) &= \frac{1,11-x}{1,11-0,93} \end{aligned}$$

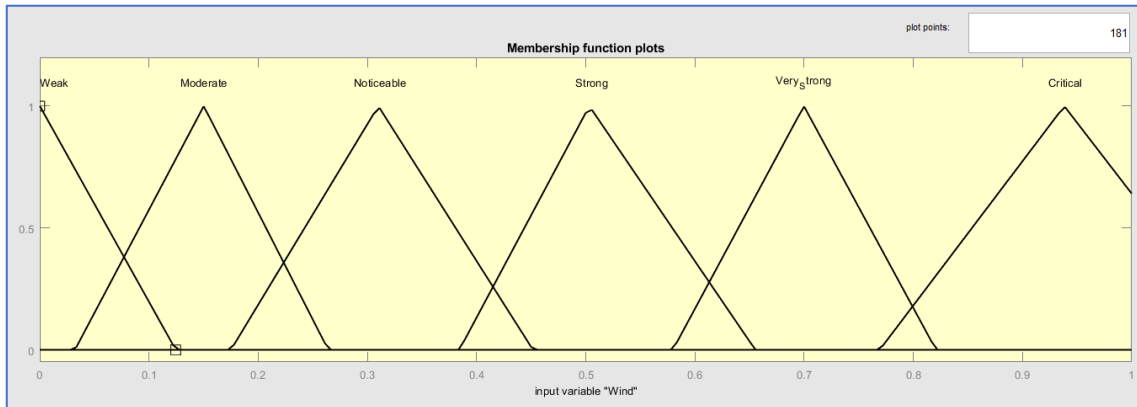


Figure 9 – Membership function: trimf

6. Visibility (Fig. 10):

$$\begin{aligned} \mu_{Excellent}(x) &= \frac{1}{1+e^{-0,09(x-13,7)}} - \frac{1}{1+e^{94,85(x-0,17)}}; \\ \mu_{Good}(x) &= \frac{1}{1+e^{0,2(x-51,4)}} - \frac{1}{1+e^{39,3(x-0,32)}}; \\ \mu_{Satisfactory}(x) &= \frac{1}{1+e^{0,39(x-63,8)}} - \frac{1}{1+e^{66(x-0,55)}}; \\ \mu_{Poor}(x) &= \frac{1}{1+e^{0,5(x-17,4)}} - \frac{1}{1+e^{114(x-0,74)}}; \\ \mu_{VPoor}(x) &= \frac{1}{1+e^{0,78(x-130)}} - \frac{1}{1+e^{66,5(x-0,91)}}; \\ \mu_{Critical}(x) &= \frac{1}{1+e^{0,93(x-50,7)}} - \frac{1}{1+e^{36(x-1,17)}}. \end{aligned}$$

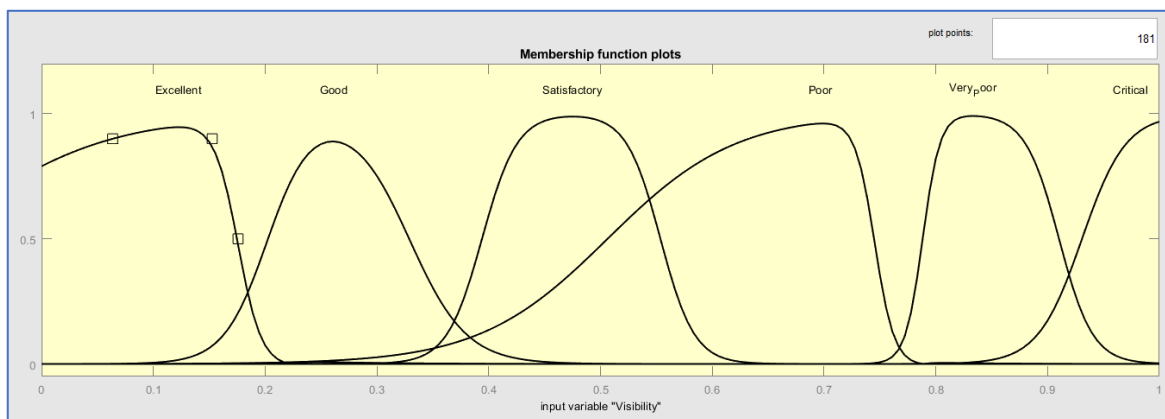


Figure 10 – Membership function: dsigmf

7. Current vessel speed (Fig. 11):

$$\mu_{VSlow}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -0,36 \\ \frac{x+0,36}{0,04+0,36} & \text{if } -0,36 < x < -0,04 \\ 1, & \text{if } -0,04 \leq x < 0,18 \\ \frac{0,18-x}{0,18-0,04} & \text{if } 0,04 < x < 0,18 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,18 \end{cases} ; \mu_{Slow}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,04 \\ \frac{x-0,04}{0,16-0,04} & \text{if } 0,04 < x < 0,16 \\ 1, & \text{if } 0,16 \leq x < 0,24 \\ \frac{0,34-x}{0,34-0,24} & \text{if } 0,24 < x < 0,34 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,34 \end{cases}$$

$$\mu_{Moderate}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,25 \\ \frac{x-0,25}{0,38-0,25} & \text{if } 0,25 < x < 0,38 \\ 1, & \text{if } 0,38 \leq x < 0,46 \\ \frac{0,59-x}{0,59-0,46} & \text{if } 0,46 < x < 0,59 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,59 \end{cases} ; \mu_{Fast}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,49 \\ \frac{x-0,49}{0,59-0,49} & \text{if } 0,49 < x < 0,59 \\ 1, & \text{if } 0,59 \leq x < 0,65 \\ \frac{0,75-x}{0,75-0,65} & \text{if } 0,65 < x < 0,75 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,75 \end{cases}$$

$$\mu_{VFast}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,66 \\ \frac{x-0,66}{0,78-0,66} & \text{if } 0,66 < x < 0,78 \\ 1, & \text{if } 0,78 \leq x < 0,83 \\ \frac{0,89-x}{0,89-0,83} & \text{if } 0,83 < x < 0,88 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,88 \end{cases} ; \mu_{Critical}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,79 \\ \frac{x-0,79}{0,78-0,66} & \text{if } 0,79 < x < 0,93 \\ 1, & \text{if } 0,93 \leq x < 1,04 \\ \frac{1,44-x}{1,44-1,04} & \text{if } 1,04 < x < 1,44 \\ 0 & \text{if } x \geq 1,44 \end{cases}$$

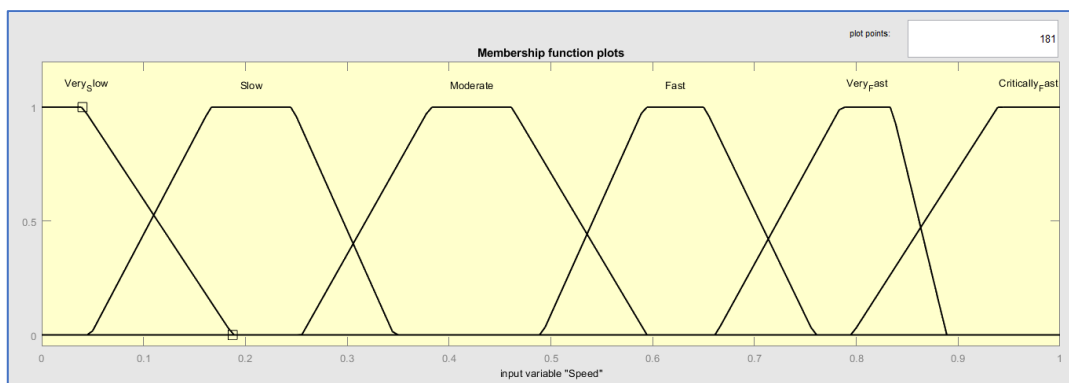


Figure 11 – Membership function: trapmf

8. Difficulty in maintaining the vessel's course (Fig. 12):

$$\mu_{VEasy}(x) = e^{-\frac{(x-0,06)^2}{2 \times 0,0007^2}} ; \mu_{Easy}(x) = e^{-\frac{(x-0,04)^2}{2 \times 0,195^2}} ;$$

$$\mu_{Moderate}(x) = e^{-\frac{(x-0,09)^2}{2 \times 0,36^2}} ; \mu_{Difficult}(x) = e^{-\frac{(x-0,09)^2}{2 \times 0,6^2}} ;$$

$$\mu_{VDifficult}(x) = e^{-\frac{(x-0,06)^2}{2 \times 0,77^2}} ; \mu_{CDifficult}(x) = e^{-\frac{(x-0,07)^2}{2 \times 1^2}} .$$

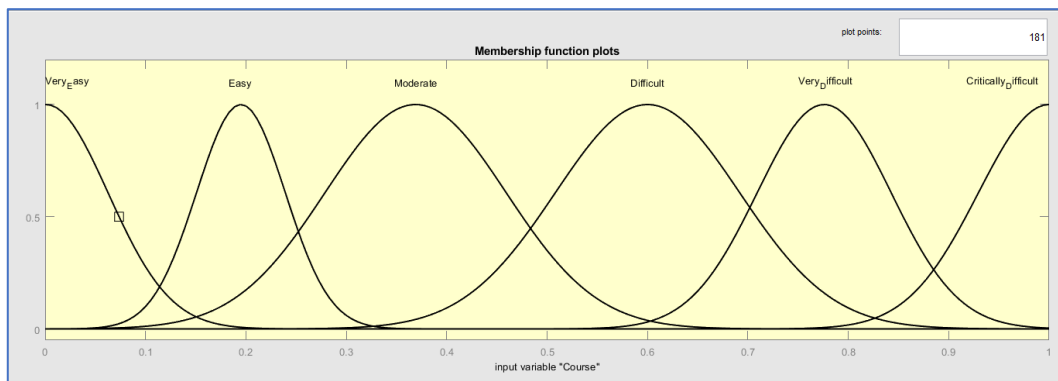


Figure 12 – Membership function: gaussmf

9. Time of day (Fig. 13):

$$\mu_{Day}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -0,36 \\ \frac{x+0,36}{0,04+0,36} & \text{if } -0,36 < x < -0,04 \\ 1, & \text{if } -0,04 \leq x < 0,16 \\ \frac{0,16-x}{0,16-0,04} & \text{if } 0,04 < x < 0,16 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,16 \end{cases} ; \mu_{Evening}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,09 \\ \frac{x-0,09}{0,13-0,09} & \text{if } 0,09 < x < 0,13 \\ 1, & \text{if } 0,13 \leq x < 0,21 \\ \frac{0,34-x}{0,34-0,21} & \text{if } 0,21 < x < 0,34 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,34 \end{cases}$$

$$\mu_{Dusk}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,31 \\ \frac{x-0,31}{0,36-0,31} & \text{if } 0,31 < x < 0,36 \\ 1, & \text{if } 0,36 \leq x < 0,44 \\ \frac{0,58-x}{0,58-0,44} & \text{if } 0,44 < x < 0,58 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,58 \end{cases} ; \mu_{Night}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,49 \\ \frac{x-0,49}{0,55-0,49} & \text{if } 0,49 < x < 0,55 \\ 1, & \text{if } 0,55 \leq x < 0,65 \\ \frac{0,78-x}{0,78-0,65} & \text{if } 0,65 < x < 0,78 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,78 \end{cases}$$

$$\mu_{DNight}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,68 \\ \frac{x-0,68}{0,76-0,68} & \text{if } 0,68 < x < 0,76 \\ 1, & \text{if } 0,76 \leq x < 0,86 \\ \frac{0,92-x}{0,92-0,86} & \text{if } 0,86 < x < 0,92 \\ 0 & \text{if } x \geq 0,92 \end{cases} ; \mu_{Dawn}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0,81 \\ \frac{x-0,81}{0,81-0,68} & \text{if } 0,81 < x < 0,92 \\ 1, & \text{if } 0,92 \leq x < 1,01 \\ \frac{1,38-x}{1,38-1,01} & \text{if } 1,01 < x < 1,38 \\ 0 & \text{if } x \geq 1,38 \end{cases}$$

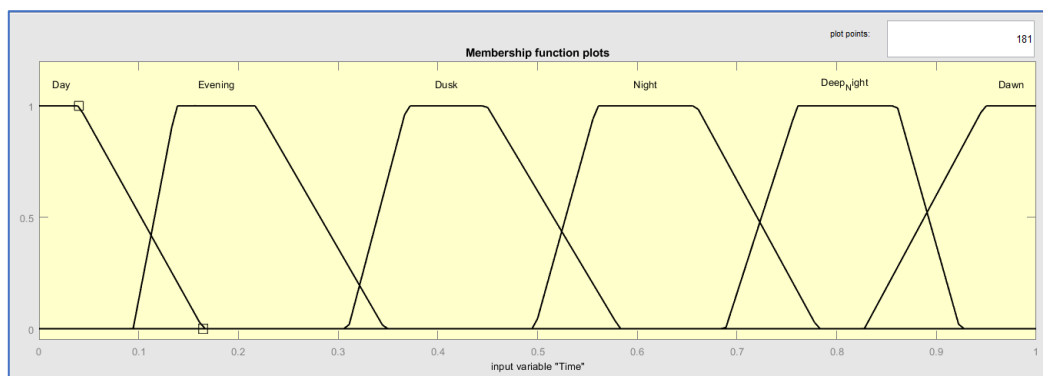


Figure 13 – Membership function: trapmf

10. Shipping intensity at the current route point (Fig. 14):

$$\mu_{VLow}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,02}{0,12} \right|^{4\frac{1}{2}}}; \quad \mu_{Low}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,26}{0,08} \right|^{4\frac{1}{2}}};$$

$$\mu_{Moderate}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,48}{0,06} \right|^4}; \quad \mu_{High}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,65}{0,05} \right|^{4\frac{1}{2}}};$$

$$\mu_{VHigh}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-0,8}{0,06} \right|^{4\frac{1}{2}}}; \quad \mu_{Critical}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-1}{0,07} \right|^{4\frac{1}{2}}}.$$

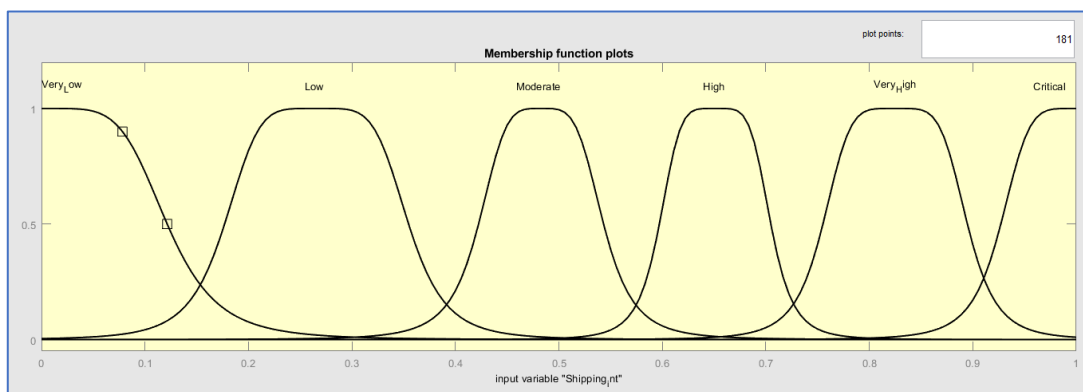


Figure 14 – Membership function: gbellmf

Thus, based on the experimental data, formal expressions of fuzzy membership functions of the type depicted in Figures 5–14 were obtained. Subsequently, fuzzy modeling will allow for the identification of factors stemming from the combination of basic qualification parameters concerning operations with navigational devices. Moreover, considering an individual qualification model will enable the determination of an individual level of danger in relation to the navigational situation based on fuzzy membership functions.

From the above, it follows that it is essential to transition to the task of simulation fuzzy modeling, taking into account the qualification model of the operator-navigator. In this context, it is necessary to investigate, based on the obtained experimental data, the influence of qualification parameters on the increase in the overall risk indicator during operations performed by the operator-navigator. For structuring, the language of fuzzy sets and fuzzy logic was utilized to determine risk and the number of factors based on various conditions and parameters. The rules are written in a structured format, commonly used for fuzzy control systems. This format allows for easy interpretation of how the system responds to different input parameters. The language used is represented by the syntax of the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox software package for fuzzy modeling.

Let's formulate fuzzy rules regarding the Bosphorus location, based on observations:

```
IF (Proximity == Very_Far) OR (Technical == Excellent) OR (Isobaths == Very_Far) OR
(Currents == Weak) OR (Wind == Weak) OR (Visibility == Excellent) OR (Speed == Very_Slow) OR (Course
== Very_Easy) OR (Time == Day) OR (Shipping_int == Very_Low) THEN (Risk = Low) AND
(Number_of_factors = Moderate)
```

```
IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Satisfactory) OR (Isobaths == Far) OR (Currents
== Moderate) OR (Wind == Weak) OR (Visibility == Excellent) OR (Speed == Very_Slow) OR (Course ==
Critically_Difficult) OR (Time == Dawn) OR (Shipping_int == Critical) THEN (Risk = V_High) AND
(Number_of_factors = Medium)
```

IF (Proximity == Very_Far) OR (Technical == Satisfactory) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Weak) OR (Wind == Weak) OR (Visibility == Excellent) OR (Speed == Slow) OR (Course == Difficult) OR (Time == Dawn) OR (Shipping_int == Very_Low) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = Moderate)

IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Satisfactory) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Moderate) OR (Visibility == Good) OR (Speed == Slow) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Critical) OR (Shipping_int == Critical) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = Moderate)

IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Satisfactory) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Moderate) OR (Visibility == Good) OR (Speed == Average) OR (Course == Difficult) OR (Time == Day) OR (Shipping_int == Medium) THEN (Risk = Moderate) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Close) OR (Technical == Good) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Good) OR (Speed == Fast) OR (Course == Moderate) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_int == High) THEN (Risk = V_High) AND (Number_of_factors = High)

IF (Proximity == Close) OR (Technical == Poor) OR (Isobaths == Very_Close) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Poor) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == Very_High) THEN (Risk = Critical) AND (Number_of_factors = Critical)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Average) OR (Isobaths == Very_Close) OR (Currents == Average) OR (Wind == Average) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Average) OR (Course == Moderate) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_int == Medium) THEN (Risk = Moderate) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Satisfactory) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Moderate) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == High) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = High)

IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Minor_Hull_Deformation) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Moderate) OR (Course == Difficult) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_int == High) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Minor_Hull_Deformation) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Moderate) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Moderate) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_int == Very_High) THEN (Risk = V_High) AND (Number_of_factors = High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_int == Very_High) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Moderate) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Dawn) OR (Shipping_int == Critical) THEN (Risk = V_High) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Minor_Hull_Deformation) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Noticeable) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == Critical) THEN (Risk = V_High) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Moderate) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Poor) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == High) THEN (Risk = V_High) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Minor_Hull_Deformation) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Noticeable) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Poor) OR (Speed == Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_int == Very_High) THEN (Risk = High) AND (Number_of_factors = Medium)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Minor_Hull_Deformation) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Poor) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == Very_High) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Very_Strong) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Moderate) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_int == Critical) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Very_Close) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Satisfactory) OR (Speed == Poor) OR (Course == Fast) OR (Time == Deep_Night) OR (Shipping_intensity == Very_High) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Moderate) OR (Currents == Noticeable) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Deep_Night) OR (Shipping_intensity == Critical) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Very_Close) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_intensity == Very_High) THEN (Risk == High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Very_Close) OR (Currents == Very_Strong) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Critical) OR (Speed == Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Dawn) OR (Shipping_intensity == Critical) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Critical) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Critical) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_intensity == High) THEN (Risk == High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Medium) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Critical) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_intensity == Critical) THEN (Risk == Very_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Severe_Damage) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Critical) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Critically_Fast) OR (Course == Difficult) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_intensity == High) THEN (Risk == Medium_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Close) OR (Technical == Severe_Damage) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Critical) OR (Wind == Strong) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_intensity == Very_High) THEN (Risk == Medium_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Severe_Damage) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Critical) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Critically_Fast) OR (Course == Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_intensity == Critical) THEN (Risk == Medium_High) AND (Number_of_factors == High)

IF (Proximity == Very_Close) OR (Technical == Minor_Damage) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Very_Strong) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Fast) OR (Course == Very_Difficult) OR (Time == Dusk) OR (Shipping_intensity == High) THEN (Risk == Medium) AND (Number_of_factors == Medium)

IF (Proximity == Close) OR (Technical == Minor_Damage) OR (Isobaths == Far) OR (Currents == Strong) OR (Wind == Noticeable) OR (Visibility == Critical) OR (Speed == Very_Fast) OR (Course == Critically_Difficult) OR (Time == Evening) OR (Shipping_intensity == High) THEN (Risk == Medium) AND (Number_of_factors == Medium)

IF (Proximity == Too_Close) OR (Technical == Minor_Damage) OR (Isobaths == Close) OR (Currents == Very_Strong) OR (Wind == Very_Strong) OR (Visibility == Very_Poor) OR (Speed == Critically_Fast) OR (Course == Difficult) OR (Time == Night) OR (Shipping_intensity == Critical) THEN (Risk == Medium_High) AND (Number_of_factors == Medium)

The formulated rules will be incorporated into the Mamdani rule base [23] (Fig. 15, 16):

1. Fuzzy Rule Activation (1):

For each rule R_i , $i = 1, 2, \dots, 30$, the degree of truthfulness of the rule is determined:

$$\alpha_{R_i} = T(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_m}(x_m)), \quad (1)$$

where T is the T-norm (the "and" operation in fuzzy logic),

μ_{A_j} is the membership function for the input variable x_i ,

x_i the i -th input variable.

2. Fuzzy Implication (2):

Using fuzzy implication, we derive the conclusions for each rule:

$$B_i^* = I(\alpha_{R_i}, B_i), \tag{2}$$

where B_i^* the conclusion or output for the i-th rule after its activation,
 I is the implicational function (often, the Minimum or Product is used),
 B_i the i-th output set or variant.

3. Aggregation of All Conclusions (3):

All individual conclusions are aggregated into a single overall membership function:

$$B^* = S(B_1^*, B_2^*, \dots, B_n^*), \tag{3}$$

where B^* the overall aggregated membership function for all conclusions,
 S is the S-norm (the "or" operation in fuzzy logic).

4. Defuzzification (4):

Using a defuzzification method, we obtain a crisp output value. Typically, the Center of Gravity (COG) method is used:

$$y^* = \frac{\int y \mu_{B^*}(y) dy}{\int \mu_{B^*}(y) dy}, \tag{4}$$

where y^* is the crisp output value,
 $\mu_{B^*}(y)$ the aggregated membership function for the output value y ,
 y the output value being integrated over all possible variants.

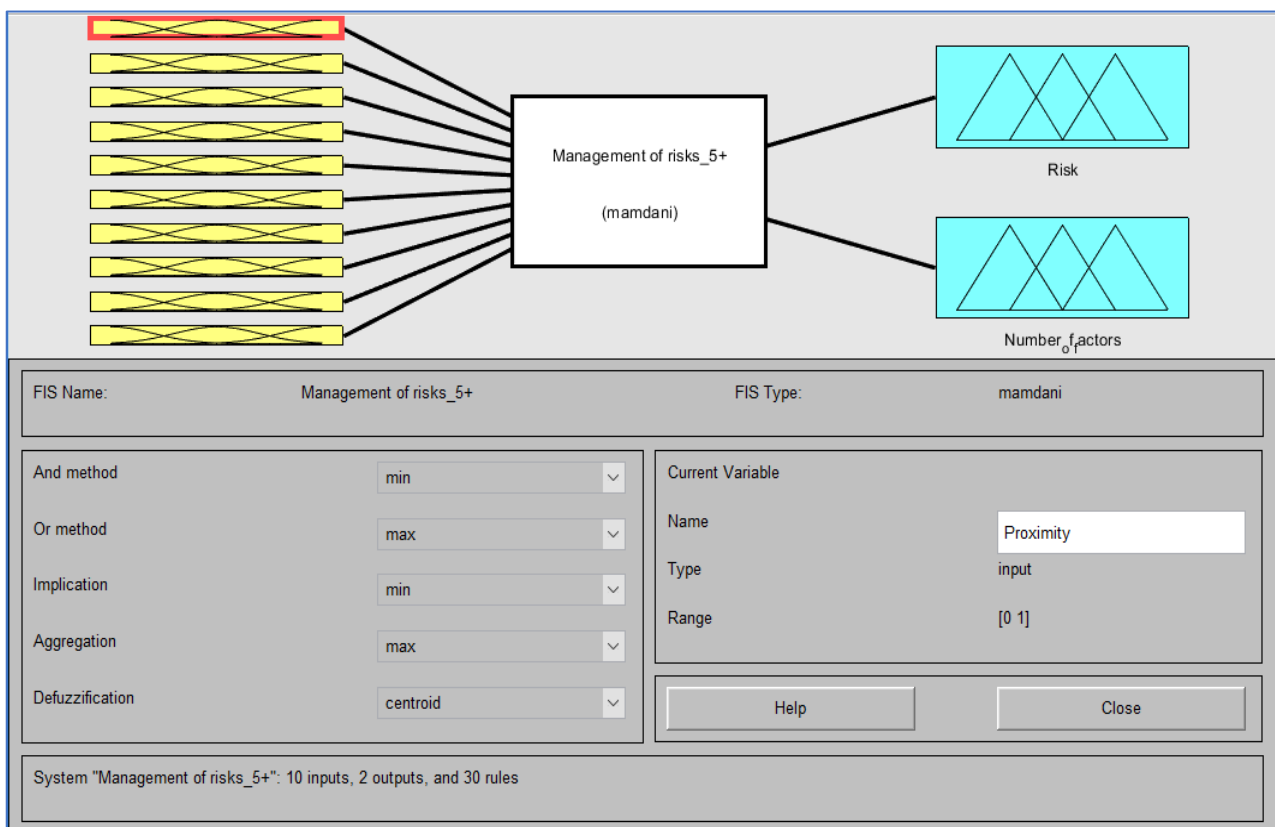


Figure 15 – Construction of the fuzzy inference system

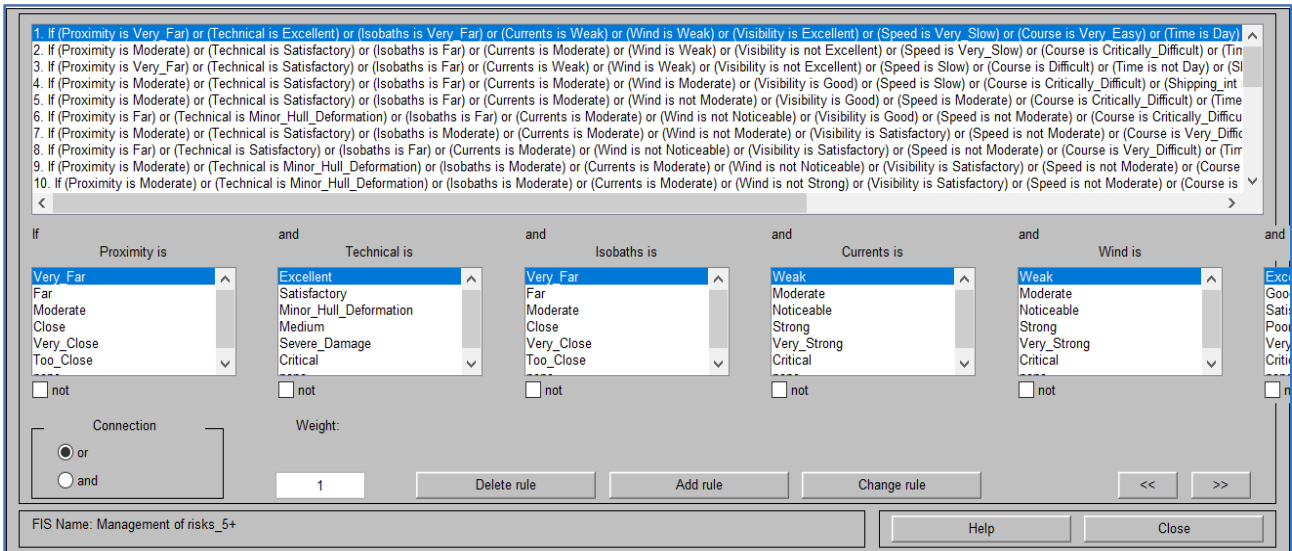
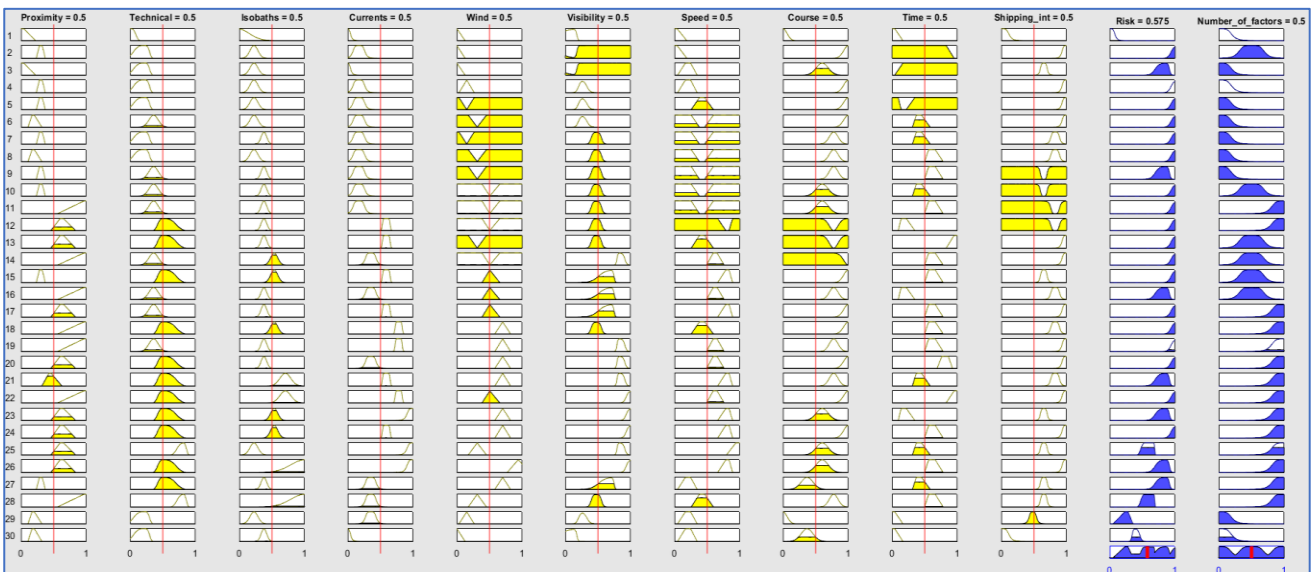


Figure 16 – Formation of the fuzzy rules system

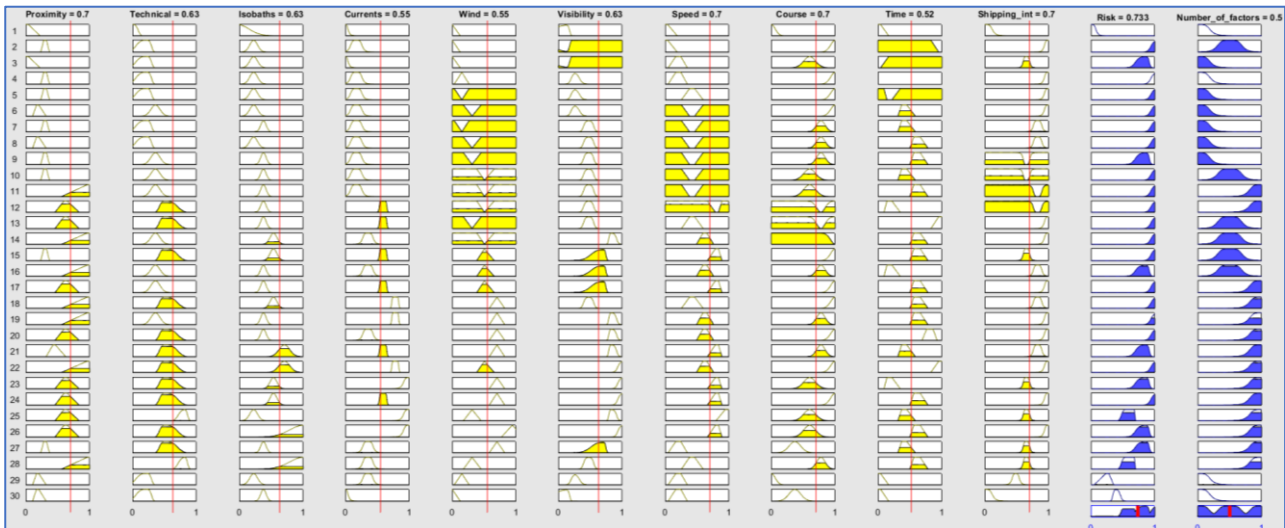
Let's consider the first waypoint in the Bosphorus strait and the risk formulation concerning a neutral situation, with indicators of 0,5 and 0,636 related to the factors (Fig. 17 a, b) to trajectory (Fig. 18).

In terms of modeling results for the first waypoint, the following groups can be distinguished:

1. Rule activation: Many rules are activated at the given input values, especially those corresponding to input data equal to 0,5. This is indicated by yellow triangles in the respective columns for each rule.
2. Risk distribution: Risk varies depending on the activated rules. Some rules lead to a higher level of risk (closer to 1), while others result in a lower risk level (closer to 0).
3. Parameter activation: "Proximity", "Technical", and "Isobaths" are mostly activated at the 0,5 level. "Currents", "Wind", and "Visibility" also have activations, but not in all rules. "Speed", "Course", "Time", and "Shipping_int" are activated at various levels in different rules.
4. Overall risk: Considering the provided input data, the overall risk is 0,575. This value might be the result of aggregation or defuzzification of the outcomes from individual rules.



a



b

Figure 17 – Fuzzy risk analysis at the first waypoint of the Bosphorus strait:
a - average risk indicators within 0.5 at the beginning of the route
b - risk indicators in the central Bosphorus strait within 0.636 of the risk range

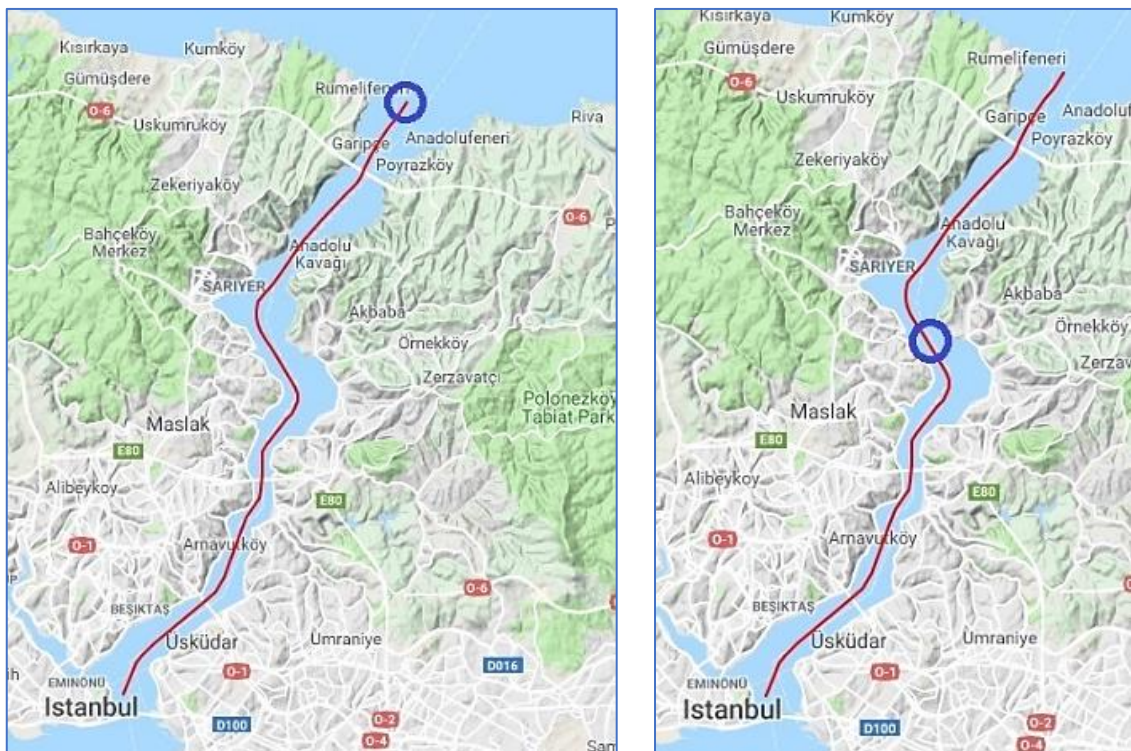


Figure 18 – Position of the vessel in the Bosphorus Strait relative to the trajectory of the vessel's route

Next, let's consider a situation where deviations in the qualification parameters of a particular shipmaster are evident. The operator's model code concerning key navigational factors is as follows: [0,7; 0,63; 0,63; 0,55; 0,55; 0,63; 0,7; 0,7; 0,52; 0,7]. This code describes the qualification level regarding each parameter, developed during training, simulator courses, and shipmaster experience in similarly complex sailing areas.

Despite the overall qualification level changing only slightly to 0,636, the risk has increased. This could classify the situation as "dangerous" since the factors demand high qualification values that are evidently lacking at this particular point in the strait. Deviations from the average value of 0,5 for each navigational parameter are accounted for by adding the missing fractions relative to the qualification parameter, thereby increasing the risk.

Overall, based on the presented chart (Fig. 18), the risk management systems indicate a relatively high risk (evaluated at 0,733) for the given set of input data. Active rules, especially in categories such as "Proximity of oncoming vessels", "Wind", "Speed", and "Course", highlight their significant influence on the overall risk assessment. Consequently, we will investigate these indicators separately (Fig. 19 *a–d*).

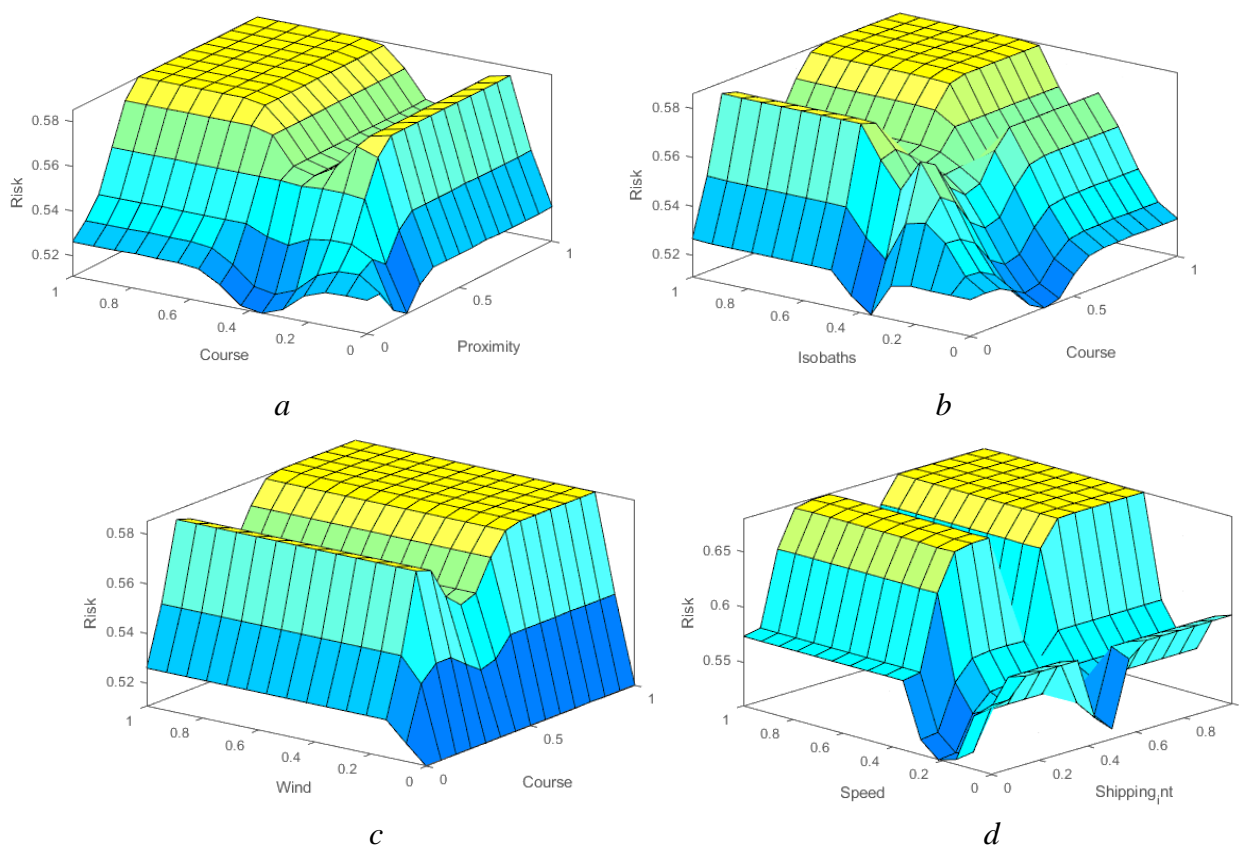


Figure 19 – Surface plots of primary factor categories influencing overall risk
 a – attitude Course and Proximity; b – attitude Isobaths and Course;
 c – attitude Wind and Course; d – attitude Speed and Shipping

As evidenced by the surface plots (Fig. 19), the qualification factor for the ability to manage the course, termed "Course", is pivotal and typically amplifies the risk in most scenarios. The interplay of other factors such as "Proximity", "Isobaths", "Wind", and "Shipping_nt" also play a crucial role in determining the overall risk, as affirmed by the dynamics of the surfaces depicted in the presented graphs.

It's essential to note that not all of the 30 available rules are activated, highlighting the specificity of the situation under consideration. The indicator for the number of navigational equipment demanding attention at this particular route point has also remained unchanged.

Conclusion. Within the scope of this research, and in line with its objectives, the automated processing of ECDIS experimental data in complex navigational areas was achieved. This phase helped reduce subjectivity in determining parameters of fuzzy membership functions concerning various navigational factors. Consequently, this allowed for the construction of a fuzzy forecasting system. Based on the derived fuzzy membership functions, their formal structure was identified, and a fuzzy rule base was established. This base is utilized by an intelligent system for identifying navigational risks while managing vessels under challenging conditions.

To determine the efficacy of the proposed fuzzy system, a simulation-based fuzzy modeling was conducted, taking into account the qualification model of the ship operator. Analysis of the experimental data revealed how qualification parameters impact the escalation of the overall risk index during vessel management.

As a result, it can be inferred that the navigator's qualification readiness significantly influences the criticality of a situation, introducing an element of uncertainty into the tasks of vessel safety and reliability. Modeling outcomes demonstrated that with a minor increase in individual parameters, the overall risk could surge by 15,8%, categorizing the situation as "dangerous" or even "critical."

All these findings indicate that risk forecasting is dependent on the specified segment of qualification parameters of a particular navigator-operator. By generalizing qualification parameters for each route waypoint, there arises the potential for anticipatory data retrieval about predicted hazards, thereby enabling risk management amidst the uncertainty of human factors.

The study successfully confirmed the feasibility of identifying qualification parameters of ship operators in intricate navigational situations using intelligent systems based on fuzzy logic. The findings can be leveraged to refine ship management systems and enhance maritime safety.

Prospects for further research might involve the collaborative use of the developed system with other artificial intelligence-based systems to establish more sophisticated management structures. Additionally, analyzing and modeling the behavioral aspects of ship operators aims to refine the risk identification system and, consequently, optimize and enhance existing algorithms considering new data and studies in the field of fuzzy logic.

The primary focus will be exploring the possibilities of integrating the devised automated system with other onboard systems, such as automatic control systems or collision avoidance systems.

REFERENCES

1. Xu, Haitong, Lúcia Moreira, and C. Guedes Soares. (2023). "Maritime Autonomous Vessels" *Journal of Marine Science and Engineering* 11, no. 1: 168. <https://doi.org/10.3390/jmse11010168>.
2. Wang, Yong and Xu, Haixiang and Feng, Hui and He, Jianhua and Yang, Haojie and Yang, Lian (2023). Deep Reinforcement Learning Based Collision Avoidance System for Autonomous Ships. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4566668>.
3. Schöller, Frederik, E. T., Mogens Blanke, M. K. (2020). Plenge-Feidenhans' and Lazaros Nalpantidis. "Vision-based Object Tracking in Marine Environments using Features from Neural Network Detections." *IFAC-PapersOnLine* 53: 14517-14523. DOI:10.1016/J.IFACOL.2020.12.1455.
4. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Socol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
5. Mallam, Steven C., Salman Nazir, and Sathiya Kumar Renganayagalu. (2019). "Rethinking Maritime Education, Training, and Operations in the Digital Era: Applications for Emerging Immersive Technologies" *Journal of Marine Science and Engineering* 7, no. 12: 428. <https://doi.org/10.3390/jmse7120428>.
6. Anita M. Rothblum, Human error and marine safety. In: National Safety Council Congress and Expo, Orlando, FL. 2000.
7. Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, JP, Langard, B. (2023). Human and organisational factors in maritime accidents: analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accid Anal Prev.* 2013 Oct; 59: 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006>. Epub 2013 May 18. PMID: 23764875.
8. Nosov, P., Zinchenko, S., Plokhikh, V., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Makarchuk, D., Mamenko, P., Moiseienko, V., & Ben, A. (2021). Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(112), 27–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239093>.

9. Chybowska, Dorota & Chybowski, Leszek & Myskow, Jaroslaw & Manerowski, Jerzy. (2023). Identification of the Most Important Events to the Occurrence of a Disaster Using Maritime Examples. *Sustainability*. 15. 10613. <https://doi.org/10.3390/su151310613>.
10. Plokhikh, V., Popovych, I., Zavatska, N., Losiyevska, O., Zinchenko, S., Nosov, P., & Aleksieieva, M. (2021). Time Synthesis in Organization of Sensorimotor Action. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 12(4), 164–188. <https://doi.org/10.18662/brain/12.4/243>.
11. Hetherington, C., Flin, R., Mearns, K. (2006). Safety in shipping: the human element. *J Safety Res.* 2006; 37(4): 401–11. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.007>. Epub 2006 Oct 16. PMID: 17046789.
12. Porathe, Thomas. (2023). Alarm and Hand-Over Concepts for Human Remote Operators of Autonomous Ships. 2861-2868. 10.3850/978-981-18-8071-1_P203-cd.
13. Hong, Seung-Kweon. (2022). Operator Function Model to Analyze Ship Accidents Related to Navigation Aids. 10.54941/ahfe1002426.
14. Chen, Xinqiang & Qi, Lei & Yang, Yongsheng & Luo, Qiang & Postolache, Octavian & Tang, Jinjun & Wu, Huafeng. (2020). Video-Based Detection Infrastructure Enhancement for Automated Ship Recognition and Behavior Analysis. *Journal of Advanced Transportation*. 2020. 1-12. 10.1155/2020/7194342.
15. Zhu, Man & Hahn, Axel & Wen, Yuan-Qiao & Bolles, Andre. (2017). Comparison and Optimization of the Parameter Identification Technique for Estimating Ship Response Models. 10.1109/CCSSE.2017.8088033.
16. Wan, Hui & Fu, Shanshan & Zhang, Mingyang & Xiao, Yingjie. (2023). A Semantic Network Method for the Identification of Ship's Illegal Behaviors Using Knowledge Graphs: A Case Study on Fake Ship License Plates. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11. 1906. 10.3390/jmse11101906.
17. Weintrit, A. (2009). *The Electronic Chart Display and Information System (ECDIS): An Operational Handbook* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439847640>.
18. Gunal, Murat, M. (2018). Maritime Simulation Using Open Source Tools: Ship Transits in Bosphorus. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61801-2_7.
19. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J. et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature* 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
20. Sii, Slive & Wang, J. & Ruxton, T. & Yang, J. & Liu, Jonhson. (2004). Application of fuzzy logic approaches to safety assessment in maritime engineering applications. *Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science, and Technology. Part A, Journal of marine engineering and technology*. 3. <https://doi.org/10.1080/20464177.2004.11020182>.
21. Redi, Mekonnen & Ulsido, Mihret & Thillaigovindan, Natesan. (2021). A Bi-level Neuro-Fuzzy System Soft Computing for Reservoir Operation. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*. 13. <https://doi.org/10.15849/IJASCA.211128.15>.
22. Macwan, N. & Sajja, Priti. (2013). Modeling performance appraisal using soft computing techniques: Designing neuro-fuzzy application. 2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing, ISSP 2013. 403–407. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526943>.
23. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1–13.

Пономарьова Вікторія, Носов Павло МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОРСЬКИХ ОПЕРАТОРІВ В УМОВАХ РИЗИКУ

Мета дослідження – підвищення безпеки мореплавства шляхом застосування методу ідентифікації та прогнозування кваліфікаційних параметрів операторів-судноводіїв на основі нечіткої логіки.

Основна проблема дослідження полягає у необхідності контролю над внутрішніми факторами невизначеності дії оператора-судноводія та створення системи, яка ідентифікує його кваліфікаційні параметри для забезпечення безпеки прийняття рішень у складних навігаційних умовах.

Методика дослідження включає в себе: а) алгоритм автоматичної обробки даних ECDIS для зменшення суб'єктивності у визначенні нечітких функцій приналежності відносно навігаційних факторів; б) формалізацію структури нечітких функцій та побудову бази правил для ідентифікації ризиків при керуванні судном у складних умовах плавання; і в) імітаційне нечітке моделювання, яке досліджує вплив кваліфікаційних параметрів на загальний показник ризику керування рухом судна.

Результати дослідження полягають у створенні інтелектуальної системи, що прогнозує навігаційні ризики у складних умовах плавання. За допомогою імітаційного моделювання виявлено, що кваліфікаційні параметри операторів-судноводіїв істотно впливають на ризик при управлінні судном. Наприклад, підвищення параметрів за чотирма показниками може значно збільшити загальний ризик, на 15,8%, переводячи ситуацію в небезпечну або критичну категорію.

Практична значущість представлена результатом автоматизованої обробки даних ECDIS, яка зменшила суб'єктивні помилки та удосконалила прогнозування навігаційних ризиків. Виявлений вплив кваліфікаційних параметрів операторів-судноводіїв на рівень ризику підкреслює важливість індивідуалізації прогнозу, що адаптовано до конкретного оператора. Практична цінність також полягає в потенціалі поліпшення безпеки мореплавства завдяки точному прогнозуванню та управлінню ризиками, враховуючи людський фактор кожного оператора. Майбутні дослідження будуть направлені на інтеграцію методу в інші системи управління рухом судна, створюючи ще більш ефективні інструменти підтримки прийняття рішень оператора в умовах внутрішньої невизначеності. Бібл. 23 рис. 19.

Ключові слова: автоматизація; організаційно-технічні системи; ризик; інтелектуальні системи; кваліфікаційні параметри; ідентифікація; нечітка логіка; невизначеність.

© Ponomaryova Victoria, Nosov Pavlo

Статтю прийнято
до редакції 22.10.2023

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

КІНЕТИКА ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ СЕКЦІЙ ТРУБ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ В ПРОЦЕСІ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Макаренко В. Д., д.т.н., професор Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: green555tree@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9178-9657;

Максимов С. Ю., д.т.н., професор, заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: maksimov@paton.kiev.ua, ORCID: 0000-0002-5788-0753;

Шатохіна І. О., старший викладач Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: shatirua8@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5767-3674;

Лобов О. О., к.т.н., доцент Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: lobov.oleksandr@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0001-8486-3847;

Сусорова О. А., старший викладач Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: helena.gaiko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6695-8196;

Стогній О. В., докторант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

Стаття містить результати натурних випробувань в умовах спеціально обладнаного полігону відрізків газопровідних труб для магістральних газопроводів, що дали можливість отримати кінематичні та динамічні параметри руйнування модельного трубопроводу під робочим навантаженням в умовах, максимально наближених до експлуатаційних. Результати натурних випробувань (при напруженнях 600...615 МПа) дали можливість встановити, що з моменту ініційованого руйнування в центральній трубі швидкість магістральної тріщини (на дві сторони від ініціатора) збільшується і сягає максимального значення на відстані близько 2–3 діаметрів від надрізу. Зміна швидкості за довжиною центральної труби може бути симетричною відносно надрізу всередині труби, чи несиметричною, що пов'язано з наявністю зміщення ініціюючого надрізу відносно середини труби і відмінністю між властивостями металу труб у зоні локального зриву. Встановлено, що загальною закономірністю є наявність максимуму швидкості росту тріщини на стадії її розгону. Показано, що досягнуті під час проведення експерименту високі швидкості руйнування збереглися при вході вершини тріщини в досліджувані ділянки, а найбільша швидкість розповсюдження тріщин спостерігається в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала - 60...- 70 °С (213...203 К).

Ключові слова: газопровід; деформація; тріщина; пластична зона; міцність.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1–2.26–27.167–173

Вступ. Забезпечення міцності та довговічності трубопроводів є надзвичайно важливою задачею, оскільки трубопровідний транспорт є важливим чинником стабільності економіки будь-якої країни, яка транзитуює чи добуває рідкі енергоносії та сировину. З огляду на це, дослідження міцності з'єднань трубопроводів та підвищення їх тріщиностійкості є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо [1–10], що пластичні деформації які неминуче виникають у зварювальних з'єднаннях і конструкціях, по своїй природі виникнення в процесі технологічного циклу виготовлення і експлуатації зварної конструкції можна розділити на наступні групи:

а) вихідні деформації в основному металі, які залежать від способу отримання і обробки металу, литтям, порошковою металургією, тиском (прокат, штампування, кування);

б) деформації, виникаючі при операціях заготовляння і збирання, різка, правка, згин, вальцівка, закріплення на збиральних пристосуваннях;

в) зварювальні деформації, що виникають внаслідок термодформацийного циклу зварювання;

г) технологічні деформації;

д) експлуатаційні деформації, які можуть мати місце в процесі експлуатації в результаті місцевих перевантажень, втрати стійкості та ін.

Постановка проблеми. Дослідження впливу різних факторів (температури, навантажень матеріалу, швидкості деформування) на розповсюдження тріщин і в цілому на стійкість трубних сталей проводилися, як правило, на стандартних зразках і в умовах, які не повністю відповідали експлуатаційним умовам роботи трубопроводів, а тому терміново виникла необхідність у проведенні натурних випробувань відрізків труб.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження кінетики деформування металу зварних труб у процесі полігонних (натурних) випробувань, а також моделювання поведінки трубних сталей на стандартних зразках при циклічному навантаженні.

Матеріали та методи. В якості матеріалу слугували трубні сталі марок 17Г1С; 15ХСНД; D32. Натурні випробування зварних відрізків труб проводили на полігоні в спеціально обладнаній барокамері. Показники кінетики деформування труб реєстрували дистанційно із дотриманням вимог безпеки для персоналу. Аналіз, реєстрацію сигналів і їх обробку проводили за допомогою аналізатора емісійних процесів (АЕП), який додатково включав у свій склад контрольний осцилограф, дисплей на базі осцилографа СІ-30, фотореєстратор ФОР-2, алфавітно-цифровий дисплей “Відеотон – 340”, двохкоординатний графопобудовник “NE-230”.

Малоциклові дослідження проводили на установці моделі “1251” фірми “Інстрон” (Великобританія), а металографічні дослідження зломів зразків вирізаних з труб на мікроскопі фірми “Джеол” (Японія). Модельне середовище готували заздалегідь згідно вимог [11].

Виклад основного матеріалу. Вплив пластичної деформації на корозійне руйнування неоднозначний, оскільки в результаті пластичної деформації можуть виникати як сприятливі так і несприятливі зміни властивостей металу і напруженого стану. Роль середовища наглядно видно з результатів повторно-статичних випробувань при $\sigma/\sigma_v = 0,8$ з частотою навантаження 10 цикл/хв зразків діаметром 10 мм, вирізаних з труби товщиною стінки 22 мм. У дослідженнях використовували дві марки сталей 15ХСНД і D32, які пройшли напередодні термообробку, зокрема загартування з відпуском на міцність 600 МПа (табл. 1).

У центрі зразку по діаметру вздовж прокатки наносили надріз довжиною 30 мм на глибину 1 мм з радіусом заокруглення у основі надрізу 0,1 мм. Результати повторно-статичних випробувань при двовісному напруженому стані наведені на рис. 1, які корелюють з результатами натурних випробувань газопровідних труб, які виконувалися безпосередньо в спеціально облаштованих барокамерах при тиску 10,9 МПа і які максимально наближені до реальних умов експлуатації газопроводів (рис. 1).

Найважливіші процеси при деформуванні які спричиняють зниження стійкості проти корозійних руйнувань в напруженому стані є:

- виникнення при деформації корозійно-активних шляхів внаслідок появи анодних фаз дефектів решітки мікро- і макронапружень поверхні і структури, які супроводжуються збільшенням концентрацій напружень II роду;
- виникненням власних напружень розтягування I роду при нерівномірній пластичній деформації.

На рис. 2 показано не однозначний вплив степені деформації розтягуванням на стійкість проти корозійного розтріскування при постійному одновісному навантаженні ($\sigma=0,9\cdot\sigma_{0,2}$) найбільш широко використаних у промисловому будівництві сталей марки 17Г1С.

Аналіз даних, наведених на рис. 1 та рис. 2 показує суттєвий вплив на швидкість росту і розповсюдження тріщин структурного складу трубної сталі. Чітко видно в'язке руйнування в зонах пластичної структури – ферит + перліт з подальшим переходом в зону крихкого руйнування, якій притаманна крихка структура – карбідів заліза. Причому, стримуючим фактором швидкого розповсюдження тріщин слугують зварювальні (монтажні – кільцеві) шви, які в даному випадку виявляються м'якою складовою структури

труби. Найбільша швидкість розповсюдження тріщин спостерігається в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала $-60\dots-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($213\dots203\text{ K}$).

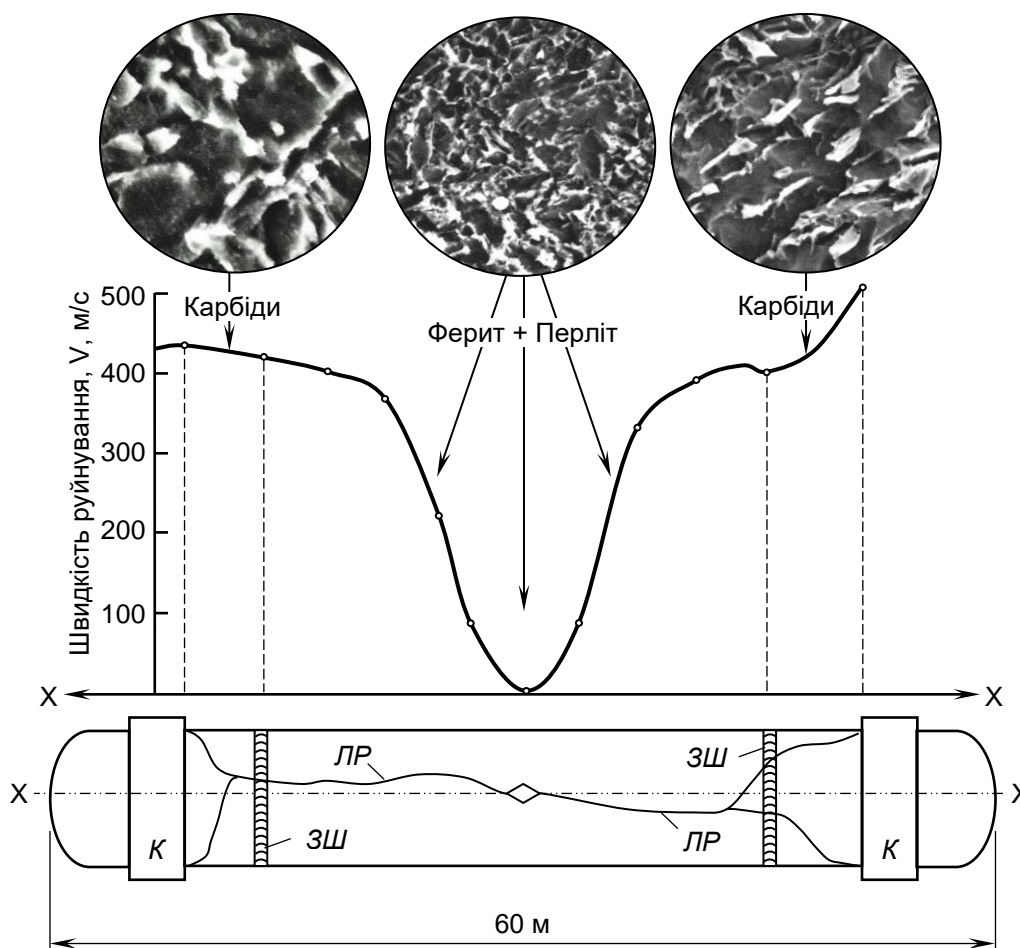


Рисунок 1 – Пневматичні випробування газопровідного трубопроводу:

Сталь 17Г1С, діаметр 820x18мм, тиск 10,9 МПа. Позначення: Ф + П – структура ферит і перліт; ЛР – лінія розриву труби; К – контейнер охолодження; ЗШ – зварювальний шов

Таким чином, у залежності від природи металу і середовища деформаційно-силової схеми ступеню і умов деформування переважають ті чи інші процеси і мають місце збільшення, чи зменшення стійкості металу проти корозійного розтріскування при змінній двовісній схемі навантаження газопроводу. Це чітко підтверджується даними викладеними на рис. 3.

Виходячи з експериментальних натурних випробувань відрізків труб (рис. 1) можна підсумувати, що використання зварних з'єднань застосовується як додатковий спосіб покращення якості трубопроводів, тобто підвищення стійкості трубопроводу проти розповсюдження поздовжніх розгалужених тріщин.

Таблиця 1 – Довговічність трубних матеріалів при двовісному мало цикловому навантаженні

Матеріали	Середовище, об'єкт досліджень	Рівень напружень МПа	Поява тріщин	
			Число циклів	Тривалість навантаження, хв
Сталь 15ХСНД	Основний метал Середовище – 3% NaCl	615	6250	1920
	Зварювальне з'єднання Середовище – 3% NaCl	605	32	25

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Сталь D32	Повітря	656	52 150	17 176
	Основний метал Середовище – NaCl	600	12 157	4061
	Зварне з'єднання – Середовище NaCl	585	16 480	5438,4

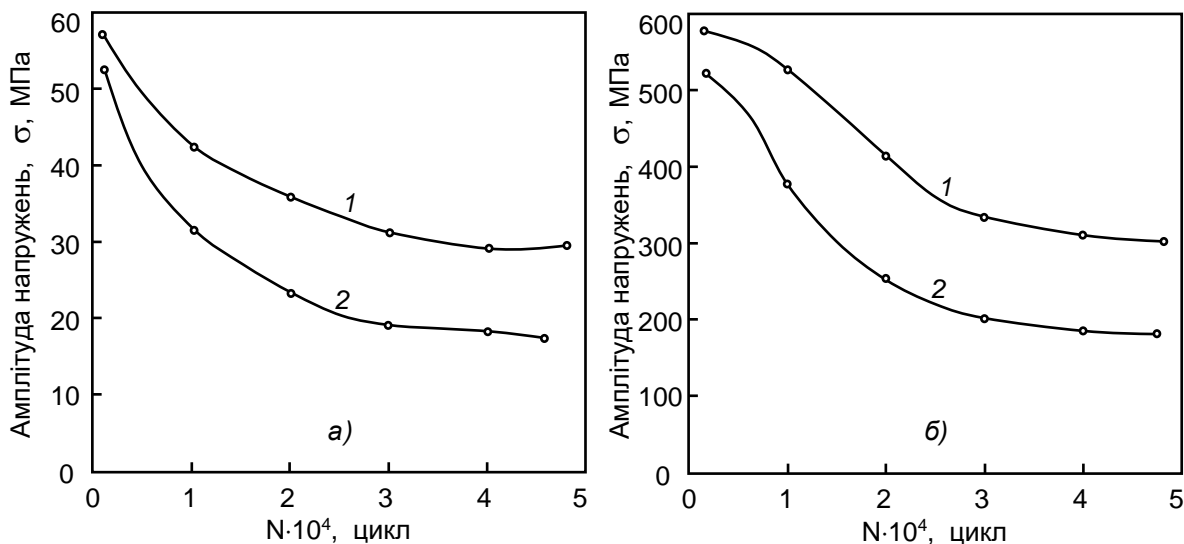


Рисунок 2 – Криві малоциклової втоми (міцності) в розчині NaCl сталі D32 (а) і 15ХСНД (б). Позначення терміну експлуатації (в роках): 1–10; 2–25

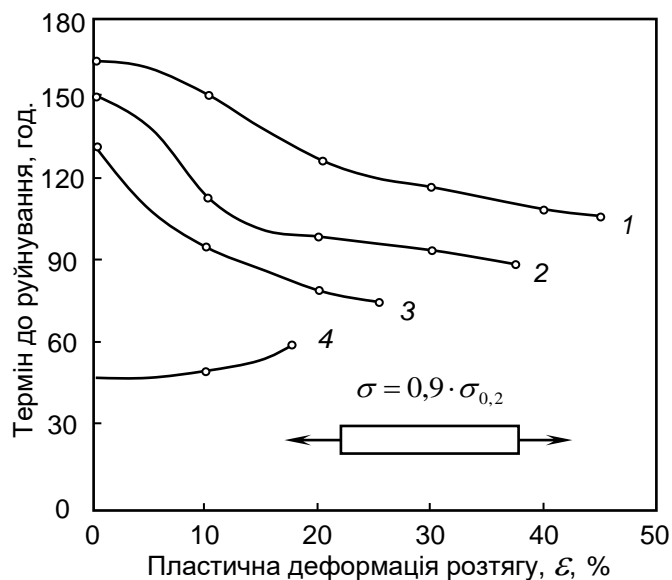


Рисунок 3 – Вплив пластичної деформації розтягуванням на корозійне розтріскування сталі 17Г1С з різними термінами експлуатації (в роках): 1–10; 2–20; 3–30; 4–40

Різну чутливість матеріалу до розтріскування при різному ступені деформації можна пояснити з точки зору впливу пластичної деформації, як джерела напружень II роду. Виникнення напруженості II роду в полікристалічних матеріалах обумовлено наступними причинами:

а) неоднорідністю пластичної деформації всередині зерен, так і між зернами внаслідок різного опору дії активних і реактивних навантажень, різноманітно орієнтованих зерен і кристалографічних площин;

б) структурними і фазовими перетвореннями, що спричиняють мікроструктурну і

хімічну неоднорідність і додаткові місцеві пружно-пластичні деформації кристалічної решітки.

Згідно сучасним дислокаційним теоріям, пластична деформація представляє собою процес зародження, переміщення, а також анігіляції дислокацій. Напружений стан дислокації залежить від характеру розташування дислокацій і відстані між ними. Неоднорідність розподілу дислокацій приводить до неоднорідності розподілу прихованої енергії деформації в деформованому об'єму металу.

Відповідно з теорією дислокацій крихкі тріщини в металі виникають у тих областях, де щільність затриманих дислокацій досягає критичної величини [12–15], тобто величина енергії пружної деформації решітки в об'ємі в результаті накопичення і взаємодії їх досягає граничної для даної решітки величини. Коли рухома тріщина проходить поблизу накопичень з критичною (чи близької до критичної) щільністю дислокацій її розповсюдження полегшується внаслідок того, що пружна енергія запасена в області, яка розташована у вершини рухомої тріщини, переходить безпосередньо в роботу руйнування.

Отже, в'язко-крихке руйнування виникає в результаті утворення як крихких тріщин внаслідок накопичення критичної щільності дислокацій, так і в'язких тріщин у результаті виходу на поверхню дислокацій.

Висновки

1. Проведені натурні випробування на спеціально обладнаному полігоні відрізків труб, призначених для будівництва магістральних газопроводів, дозволили отримати кінематичні та динамічні параметри руйнування модельного газопроводу під робочим навантаженням і в умовах, максимально наближених до експлуатаційних.

2. Аналіз результатів полігонних (натурних) випробувань при напруженнях 600...615 МПа свідчить, що з моменту ініційованого руйнування в центральній трубі швидкість магістральної тріщини (на дві сторони від ініціатора) зростає і на відстані приблизно 2–3 діаметри від надрізу досягає максимуму (≈ 440 м/с). Встановлено, що зміна швидкості по довжині центральної труби може бути симетричною відносно надрізу виконаному в середній трубі чи несиметричною. Це пов'язано з технікою проведення експерименту і умовами старту тріщини, зокрема зі зміщенням ініціюючого надрізу відносно середини труби і різними властивостями металу труб у зоні локального зриву. Загальною закономірністю залишається наявність максимуму швидкості на стадії розгону тріщини. Встановлено, що найбільша швидкість розповсюдження тріщин мала місце в областях, наближених до контейнерів з охолоджувачем, де температура металу досягала $-60...-70$ °С (213...203 К).

3. Вперше, з використанням натурних (полігонних) випробувань, досліджено вплив структурно-фазового складу трубних сталей на спротив труб корозійно-механічному розтріскуванню. При цьому показано, що найбільший спротив корозійному розтріскуванню чинить ферито-перлітна структура, у той час як карбідні фази спричиняють окрихчення металу з різким ростом швидкості розповсюдженню тріщин уздовж трубопроводу.

Перспективи подальших досліджень охоплюють вивчення впливу температури та сейсмочинників на тріщиностійкість матеріалів трубопроводів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тревого І. С., Ільків Є. Ю., Кухтар Д. В. Геодезичний контроль деформацій споруд магістральних газопроводів: монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 181 с.
2. Лучко Й.Й. Методики розрахунку та дослідження матеріалів газопроводу на міцність, втомну тріщиностійкість. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. Вип. 13. С. 54–66.
3. Федорович І. Я. Оцінювання небезпеки руйнування магістральних газопроводів з виявленими поверхневими тріщиноподібними дефектами: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища": Дата захисту 03.07.18 / І. Я. Федорович. – Івано-Франківськ, 2018. – 193 с.

4. Лучко Й.Й., Кичма А.О. Напружено-деформований стан та моніторинг проблемних ділянок трубопроводів тривалої експлуатації: монографія. Львів : Світ, 2019. 265 с.
5. Насонкіна Н. Г., Антоненко С. Є. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*, 2019. Том 15. №1. С. 23–34.
6. Maksimov S. Yu., Makarenko V. D., Tkachenko S. M., Panchenko O. S. Influence of Temperature and Long-Term Operation on Metal Durability of Pipelines of Hydrotechnical Structures. *Key Engineering Materials*, 2023, P. 25–33.
7. Makarenko V. D., Maksimov S. Yu., Makarenko Y. V., Panchenko O. S. Study of Durable Strength of Steel Mining and Metallurgical Equipment. *Solid State Phenomena*, 2022. P. 111–121.
8. Макаренко В. Д., Чепелюк О. В., Войтович О. А., Мешков Ю. Є., Макаренко Ю. В., Максимов С. Ю., Гоц В. І., Савенко В. С., Аргатенко Т. І. Методи підвищення корозійної стійкості підземних трубопроводів водопостачання. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К. : КНУБА, 2023. Вип. 42. С. 49–57.
9. Бойко А. В., Кулик В. П., Макаренко В. Д., Сизоненко А. В. Дослідження трубних сталей охолоджуючих систем тривалої експлуатації в умовах промислових виробництв. *Проблеми тертя та зношування*, Хмельницький : ХНУ, 2019. № 2 (83). С. 65–74.
10. Макаренко В. Д., Гоц В. І., Макаренко Ю. В., Аргатенко Т. І., Поліщук В. І. Дослідження аварійних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. Київ: КНУБА, 2022. № 40. С. 31–43.
11. ASTM E399-78. Method for determining crack resistance parameters (for compact samples and samples with a central notch). *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005. P. 107–116.
12. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами. *Машинознавство*, 1999. №8. С. 52–56.
13. Чирков О.Ю. Радіаційна повзучість у задачах механіки непружного деформування матеріалів та елементів конструкцій. К.: Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, 2020. 160 с.
14. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. К.: Наукова думка, 2018. 430 с.
15. Kawakubo T., Hishida M. Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005. Vol.107. P. 240–245.

REFERENCES

1. Trevoho, I. S., Ilkiv, Ye. Yu., Kukhtar, D. V. (2019). Heodezychnyi kontrol deformatsii sporud mahistralnykh hazoprovodiv : monohrafiia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.
2. Luchko, Y. I. (2018). Metodyky rozrakhunku ta doslidzhennia materialiv hazoprovodu na mitsnist, vtomnu trishchynostiikist. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. 13. 54–66.
3. Fedorovych, I. Ya. (2018). Otsiniuvannia nebezpeky ruinuvannia mahistralnykh hazoprovodiv z vyjavlenymy poverkhnevymy trishchynopodibnymy defektamy: dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.15.13 "Truboprovodnyi transport, naftohazoskhovyshcha": Data zakhystu 03.07.18. Ivano-Frankivsk. 193 p.
4. Luchko, Y. I., Kychma, A. O. (2019). Napruzhenodeformovanyi stan ta monitorynh problemnykh dilianok truboprovodiv tryvaloi ekspluatatsii: monohrafiia. Lviv : Svit.
5. Ilnytskyi, Yu. V. (2012). Analiz vidmov ta avarii na mahistralnykh hazoprovodakh UMN "Lvivtranshaz" i zakhody dlia zapobihannia yikh vynykenniu. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*, № 2. 210–214.
6. Nasonkina, N. G., & Antonenko, S. E. (2019). Damage analysis of water and sewer networks. *Modern industrial and civil construction*, 15(1). 23–34.

7. Maksimov, S. Yu., Makarenko, V. D., Tkachenko, S. M., Panchenko, O. S. (2023). Influence of Temperature and Long-Term Operation on Metal Durability of Pipelines of Hydrotechnical Structures. *Key Engineering Materials*, P. 25–33.
8. Makarenko, V. D., Maksimov, S. Yu., Makarenko, Y. V., Panchenko, O. S. (2022). Study of Durable Strength of Steel Mining and Metallurgical Equipment. *Solid State Phenomena*, P. 111–121.
9. Makarenko, V. D., Chepeliuk, O. V., Voitovych, O. A., Mieshkov, Yu. Ye., Makarenko, Yu. V., Maksymov, S. Yu., Hots, V. I., Savenko, V. S., Arhatenko, T. I. (2023). Metody pidvyshchennia koroziiinoi stiikosti pidzemnykh truboprovodiv vodopostachannia. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. K.: KNUBA/ Vyp. 42. 49–57.
9. Boiko, A. V., Kulyk, V. P., Makarenko, V. D., Syzonenko, A. V. (2019). Doslidzhennia trubnykh stalei okholodzhuiuchykh system tryvaloї ekspluatatsii v umovakh promyslovykh vyrobnytstv. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, Khmelnytskyi: KhNU. 2019. № 2 (83). 65–74.
10. Makarenko, V. D., Hots, V. I., Makarenko, Yu. V., Arhatenko, T. I., Polishchuk, V. I. (2022). Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. Kyiv: KNUBA, № 40. 31–43.
11. ASTM E399-78. (2005) Method for determining crack resistance parameters (for compact samples and samples with a central notch). *Journal of Engineering Materials and Technology*. – P. 107–116.
12. Chaplia, O., Radkevych, O., Piasetskyi, O., Spektor, Ya. (1999). Porivnialnyi analiz koroziiino-mekhanichnykh vlastyvostei vitchyznianoї trubnoi stali 20IuCh z inozemnymy analohamy. *Mashynoznavstvo*, 1999. № 8. 52–56.
13. Chyrkov, O. Iu. (2020). Radiatsiina povzuchist u zadachakh mekhaniky nepruzhnoho deformuvannia materialiv ta elementiv konstruksii. Kyiv: Instytut problem mitsnosti imeni H. S. Pysarenka NAN Ukrainy.
14. Pisarenko, G. S., Stryzhalo, V. A. (2018). Experimental methods in the mechanics of a deformable solid. Kyiv: Naukova Dumka.
15. Kawakubo, T., Hishida, M. (2005). Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis on Environmentally Accelerated Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107. P. 240–245.

Makarenko V. D., Maksymov S. Yu., Shatokhina I. O., Lobov O. O., Susorova O. A., Stognii O. V.
KINETICS OF METAL DEFORMATION OF WELDED PIPE SECTIONS UNDER CYCLIC LOADING IN THE PROCESS OF FIELD TESTS

Full-scale tests were carried out at a specially equipped test site for pipe sections intended for the construction of main gas pipelines, which made it possible to obtain kinematic and dynamic parameters of the destruction of a model gas pipeline under operating load and in conditions as close as possible to operational ones. Analysis of the results of field (full-scale) tests indicates that from the moment of initiation of destruction in the central pipe, the speed of the main crack (on both sides of the initiator) increases and reaches a maximum at a distance of approximately 2-3 diameters from the notch. The change in speed along the length of the central pipe can be symmetrical relative to the cut made in the central pipe or asymmetrical. This is due to the experimental technique and the crack initiation conditions, in particular, the displacement of the initiating notch relative to the middle of the pipe and the different properties of the pipe metal in the local failure zone. The general pattern remains the presence of a maximum velocity at the stage of crack acceleration. It should be noted that in order to conduct the experiment, in order to achieve high fracture rates, the crack tips were preserved upon entering the studied areas. This condition is ensured by suitable selection of the viscosity of the metal of the central pipe.

First, using full-scale (polygon) tests, the influence of the structural phase composition of pipe steels on the resistance of pipes to corrosion-mechanical cracking was investigated. At the same time, it is shown that the ferrite-pearlite structure has the greatest resistance to corrosion cracking, while the carbide phases cause embrittlement of the metal with a sharp increase in the rate of crack propagation along the pipeline.

Key words: pipe; deformation; crack; plastic zone; strength.

© Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Шатохіна І. О., Лобов О. О., Сусорова О. А., Стогній О. В.

Статтю прийнято
до редакції 05.10.2023

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті українською чи англійською мовами, що містять результати власних оригінальних досліджень, які мають наукову і практичну цінність і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – 10...15 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

Інформація про автора(ів): прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва установи або громадської організації, держава, e-mail, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2,00 см;

палітурка – 0,00 см;

колонтитули – 1,30 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки не нумерувати.

У статті наводяться тільки ті формули, рисунки, таблиці, що забезпечують розкриття змісту представленого дослідження, всі вони повинні мати посилання в тексті статті.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

Структура статті:

- вступ;
- постановка проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- мета та задачі дослідження;
- виклад основного матеріалу (методи дослідження, розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети);
- основні результати та їх обговорення;
- висновки;
- перспективи подальших досліджень;
- список використаної літератури.

Основні розділи можуть мати назви, дещо відмінні від приведених вище найменувань зі збереженням їх загальної логічної послідовності.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ 8302:2015. Список має налічувати 15...30 найменувань, з яких мінімум 2/3 опублікованих за останні 10 років, з них не менше 5 закордонних. Не менше 3 посилань має бути на статті з видань, що індексуються базами Scopus та/або Web of Science Core Collection. Обсяг самоцитуювання (посилання на свої попередні публікації) допускається не більше 1/3 загальної кількості джерел.

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (**References**), для його оформлення використовується APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською мовою обсягом від 150 до 250 слів та англійською мовою обсягом не менше 1800 знаків надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на іншій мові – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

Основні вимоги до анотацій:

- анотація має бути написана так, щоб мати можливість бути представленою і сприйнятою читачем окремо від статті;
- анотація має бути позбавленою дублювання інформації, що наведена в заголовку статті;
- анотація має бути інформативною, змістовною, містити коротку інформацію про дослідження, що представлені в анотованій роботі – галузь, до якої відноситься робота, актуальність, застосовані методи, основні результати, їх значення для теорії та практики;
- речення, використані в анотації мають містити 10...20 слів, бути зрозумілими для читача без зайвої примітивізації;
- у тексті анотації слід використовувати ключові слова з тексту статті;
- анотація англійською мовою не має бути сліпим дублюванням анотації українською мовою, а бути самостійним цілісним текстом.

Документи, що подаються до редакції.

Для публікації автор повинен надати до редакції електронною поштою (на пошту journalnvsma@gmail.com) електронний варіант наступних документів:

- комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською і англійською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів двома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір підписаний усіма авторами;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Статті, подані на розгляд, проходять перевірку на плагіат та подвійне сліпе рецензування. Для рецензування редакційна колегія може залучати сторонніх фахівців за відповідним напрямом.

Редакційна колегія залишає за собою право приймати рішення щодо відповідності представлених робіт напрямом журналу. Матеріали, що не оформлені згідно наведених правил, містять плагіат, чи не відповідають напрямом журналу будуть відхилені.

Положення про конфіденційність

Імена та електронні адреси, вказані користувачами на сайті цього журналу, будуть використані виключно для виконання внутрішніх технічних завдань цього журналу; вони не будуть поширюватись та передаватись стороннім особам.

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS

Only articles in Ukrainian or English containing the results of authors own original research, which have scientific and practical value and have not been published yet, could be accepted for publication. Purely review articles are not accepted for publication. The author is responsible for the content of the article.

According to the requirements of item 3 of the Resolution of the Presidium of the Supreme Certifying Commission of Ukraine No. 7-05 /1 dated 15.01.2003, scientific articles submitted for publication should contain the following elements: statement of the problem in a general form and its connection with important scientific or practical tasks; analysis of the recent studies and publications in which the solution to the problem, which the author refers to, was initiated; selection of previously unresolved parts of a general problem, to which the article is devoted; formulation of article goals (statement of the task); presentation of the main material of the study with a full justification of obtained scientific results; conclusions and prospects for further scientific research in this area.

Article total volume allowed is 10...15 pages with all materials embodied, including tables, figures, graphs and reference list. The sum of figures and tables should be no more than 30% of the research body.

Article design. The following information shall be placed on the first page of the manuscript: Universal Decimal Classification (UDC) index, article title, surname, initials, and scientific degree (academic status) of the author (s).

Universal Decimal Classification (UDC) index is to be placed on the left side, font size – 10 pt.

Article title is to be placed in the centre in block letters (bold type, font size – 14 pt.).

Information about an author (s): surname, initials, academic degree, academic status, occupational title, full name of institution or public organization, country, e-mail address, author's ORCID is to be indicated in Italics, on the left side, font size – 12 pt.

The text is to be given in MS Word document format, font – Times New Roman, font size – 12 pt., line spacing – 1.

Page setup (menu option FILE, Page setup):

paper size – A4: 210*297 mm;

paper layout – book (album is forbidden);

margins – 2.00 cm;

casework – 0.00 cm;

page header/footer – 1.30 cm;

paragraph indent – 1.25 cm, full justification, no page numbering is required.

The article is to contain only those formulas, figures, tables that provide disclosure of the content of the presented research, all of them must be referenced in the text of the article.

Formulas should be typed using the built-in Equation Editor formula editor. All formulas are to be inserted into a table with no outline, consisting of two columns: the first column is to contain a formula without a paragraph and centre justified, the second one is to contain a formula number (if any), without a paragraph and centre justified. The border between the columns of the table is to be set at 14 cm.

This also applies to formulas and formula characters that appear in the text. The parameters in the formula editor must exactly match the following:

Sizes (Equation Editor menu option: SIZE, Determine ...):

- Regular 12 pt.
- Large index 7 pt.
- Small index 5 pt.
- Large character 18 pt.
- Small character 12 pt.

Tables are to be made up in Microsoft Word.

Figures should be black and white, preferably transparent, and inserted into the file and article print. Figure format (tif, pcx, bmp, etc.) must be compatible with the Microsoft Word text editor. Figure resolution is to be at least 300 dpi.

Article structure:

- introduction;
- statement of the problem;
- analysis of the recent research and publications;
- the purpose and objectives of the research;
- statement of the main material (research methods, problems solutions to ensure the achievement of the objectives);
- discussion of results;
- conclusions;
- directions for further research;
- reference list.

The main sections may have names that are slightly different from the names given above while maintaining the general logical sequence.

Reference list is to be given in the form of a general list at the end of the manuscript (the sequence is to be in the order of citation) in accordance with the established requirements of DSTU 8302: 2015 standard. The list should contain total 15...30 titles, of which at least 2/3 published in the last 10 years, of which at least 5 foreign. There should be at least 3 references to articles from publications indexed by the Scopus and/or Web of Science Core Collection databases. The amount of self-citation (links to your previous publications) is allowed to be no more than 1/3 of the total number of sources.

The article is to be followed by the reference list in Roman alphabet (**References**). ARA-style is to be used when executing it. The reference list is to be transliterated or translated into English. Information transliteration is required to be in accordance with the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 27.01.2010 “Concerning the regulation of Ukrainian alphabet transliteration by Roman alphabet” (Ukrainian language transliteration can be done at <http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=> [select standard: Passport (CMU 2010)]).

It is not required to transliterate the sources written in Roman alphabet.

Structured abstracts in Ukrainian (150 to 250 words) and English (not less than 1800 words) languages are given as follows: an abstract is given before the introduction if it has been executed in article source language, but if an abstract has been executed in a language different from article source one, an abstract is given after the text of the article. Keywords list is given under the abstract.

Basic requirements for abstracts:

- the abstract must be written in such a way as to be able to be presented and perceived separately from the article;
- the abstract must be devoid of duplication of information given in the title of the article;
- the abstract should be informative, meaningful, contain brief information about the research presented in the annotated paper - the field to which the work belongs, relevance, applied methods, main results, their significance for theory and practice;
- the sentences used in the abstract should contain 10...20 words, be understandable to the reader without excessive primitiveness;
- keywords from the text of the article should be used in the text of the abstract;
- the abstract in English should not be a blind duplication of the abstract in Ukrainian, but should be an independent, complete text.

The documents to be submitted to the editorial office.

In order to be published, the author is required to submit electronic (to journalnvsma@gmail.com) version of the following documents to the editorial office:

- electronic article – a file, typed in Microsoft Word editor;
- a separate file of each figure included in the article.

Along with the article text, the author (s) must submit:

- structured abstract with keywords list in both Ukrainian and English languages, including article's title and author (s) surname (s) in three languages – on a separate page;
- license contract;

- information about authors (surname, name, middle name, academic degree, academic title, place of employment, occupation title, home or work address, contact telephone number, e-mail address, scientific interests of authors, author (s) ORCID – on a separate page.

Articles submitted for consideration are checked for plagiarism and double-blind peer review. For review, the editorial board can involve external experts in the relevant direction.

The editorial board reserves the right to make decisions regarding the compliance of the presented works with the directions of the magazine. Materials that are not designed according to the above rules, contain plagiarism, or do not correspond to the directions of the journal will be rejected.

Privacy Statement

The names and email addresses provided by users on journal's site, shall be used solely to perform the internal technical tasks of this journal; they shall not be distributed or transmitted to any outside parties.

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Бень А. П., Соколов А. В.** 6
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ПЛАНІВ КОНТЕЙНЕРОВИЗІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ
- Калініченко Є. В., Заєць А. Ю.** 17
ПЕРСПЕКТИВНА СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ МОРСЬКИХ ГЛИБИН
- Піпченко О. Д., Конон Н. М.** 29
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ ПО ЗАДАНИЙ ТРАЄКТОРІЇ
- Товстокорий О. М., Зінченко С. М., Нагрибельний Я. А., Тимофєєв К. В.** 44
РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ СУДНА
- Шумило О. М.** 56
ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ПОКАЗНИКИ ВИКОНАННЯ МАНЕВРУ «ЗИГЗАГ»

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Nosov P., Zinchenko S., Nahrybelnyi Ya., Onyshko D., Polishchuk V.** 70
DEVELOPMENT AND 3D PRINTING OF VESSEL MODELS WITH AUTOMATED TRAFFIC CONTROL SYSTEMS
- Plotnikov V. I., Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V.** 82
MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX
- Крапивко Г. І.** 96
ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ GaAs СПОЛУК В МОДУЛЯХ ОРІЄНТАЦІЇ ОРБІТАЛЬНИХ МЕТЕОСУПУТНИКІВ
- Луб'яний П. В., Войтович О. А., Кузьменко І. О.** 107
ДОСТУПНІСТЬ ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ З ОГЛЯДУ ФОРМУВАННЯ ТАРИФУ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Mateichuk V., Zinchenko S., Tovstokoryi O.** 120
AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL IN A STORM

Polyvoda O. V., Polyvoda V. V., Simanenkov A. L. 133
METHOD OF THE SHIP MAIN ENGINE CONDITION OPERATIONAL
DIAGNOSTICS

Ponomaryova V., Nosov P. 144
METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF QUALIFICATION
PARAMETERS FOR MARINE OPERATORS UNDER RISK CONDITIONS

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Шатохіна І. О., Лобов О. О.,
Сусорова О. А., Стогній О. В.** 167
КІНЕТИКА ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ СЕКЦІЙ ТРУБ ПРИ
ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ В ПРОЦЕСІ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ 174

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Ben A. P., Sokolov A. V.** 6
ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF THE METHODS OF CONTAINER
CARGO PLANS FORMATION AND WAYS OF THEIR FURTHER
IMPROVEMENT
- Kalinichenko Ye. V., Zaiets A. Yu.** 17
DEVELOPMENT OF BASIC APPROACHES TO ORGANIZING SOFTWARE
FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES FOR SOLVING SURVEY
TASKS
- Pipchenko O. D., Konon N. M.** 29
ENHANCEMENT OF SHIP HANDLING TECHNIQUES ALONG A
PREDETERMINED TRAJECTORY
- Tovstokoryi O. M., Zinchenko S. M., Nahrybelnyi Ya. A., Tymofeiev K. V.** 44
CALCULATION OF THE VESSEL'S ROTATION CENTER DISPLACEMENT
- Shumylo O. M.** 56
INFLUENCE OF THE ELECTRIC SHIPS' DESIGN PARAMETERS ON THE
PERFORMANCE OF THE «ZIGZAG» MANEUVER

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

- Nosov P., Zinchenko S., Nahrybelnyi Ya., Onyshko D., Polishchuk V.** 70
DEVELOPMENT AND 3D PRINTING OF VESSEL MODELS WITH
AUTOMATED TRAFFIC CONTROL SYSTEMS
- Plotnikov V. I., Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V.** 82
MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF
THE NAVIGATION COMPLEX
- Krapyvko H. I.** 96
EXPEDIENCY OF USING GaAs COMPOUNDS IN ORIENTATION MODULES
OF ORBITAL METEOROLOGICAL SATELLITE
- Lubyanyi P. V., Voytovych O. A., Kuzmenko I. O.** 107
AVAILABILITY OF PASSENGER TRANSPORT FOR THE PUBLIC FROM THE
POINT OF VIEW OF TARIFF FORMATION

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Mateichuk V., Zinchenko S., Tovstokoryi O.** 120
AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL IN A STORM

Polyvoda O. V., Polyvoda V. V., Simanenkov A. L. 133
METHOD OF THE SHIP MAIN ENGINE CONDITION OPERATIONAL
DIAGNOSTICS

Ponomaryova V., Nosov P. 144
METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF QUALIFICATION
PARAMETERS FOR MARINE OPERATORS UNDER RISK CONDITIONS

MATERIALS SCIENCE

**Makarenko V. D., Maksymov S. Yu., Shatokhina I. O., Lobov O. O.,
Susorova O. A., Stognii O. V.** 167
KINETICS OF METAL DEFORMATION OF WELDED PIPE SECTIONS
UNDER CYCLIC LOADING IN THE PROCESS OF FIELD TESTS

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS 177

Наукове видання

**НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1–2 (26–27)

Видається з 2009 року

Відповідальний за випуск *Р. С. Врублевський*
Технічний редактор *Г. А. Врублевська*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Ум. др. арк. 11,5.
Підписано до друку 25.12.2023.
Тираж 100 прим.

Видавець і виготовлювач
Херсонська державна морська академія,
просп. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000
Ел. адреса: rvv@ksma.ks.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої
справи до Державного реєстру
ДК № 4319 від 10.05.2012