

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
Київський інститут водного транспорту імені гетьмана
Петра Конашевича-Сагайдачного

ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Збірник наукових праць

випуск 1 (39)

Київ
2024

Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. – Випуск 1 (39). – 275 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39>

У збірнику публікуються матеріали, що відображають наукову й методичну роботу викладачів і здобувачів Державного університету інфраструктури та технологій, закладів вищої освіти, фахівців підприємств і організацій водного транспорту.

Більшість публікацій присвячена проблемам галузі, експлуатації засобів водного транспорту, зокрема, розглядаються питання інфраструктури, технологій та організації транспортних процесів, впровадження сучасних технологій, математичного моделювання, екологічної безпеки, економічних аспектів діяльності річкового та морського транспорту й якісної підготовки фахівців з даного напрямку.

Збірник має чотири тематичні розділи: «Судноводіння та енергетика суден», «Методика навчання», «Інформаційні технології», «Екологічна безпека».

Засновник: Державний університет інфраструктури та технологій

Адреса редакції: вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071

Телефон: +38(044) 482-51-38

E-mail редакції: vtduit@gmail.com; інформаційний сайт: <http://vt.duit.edu.ua>

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Головний редактор – доктор технічних наук, професор Тимощук О.М.

Редакційна колегія:

Дубинець О.І. д.т.н., професор (ДУІТ); Ганношина І.М., к.т.н., Тихонов І.В., д.т.н., с.н.с., доцент (ДУІТ); Маранов О.В. к.т.н., доцент (ДУІТ); Давидов В.С. к.т.н., доцент (ДУІТ); Сьомін О.А., к.т.н (ДУІТ); Мельник О.В. к.т.н., доцент (ДУІТ); Горобченко О.М., д.т.н., професор (ДУІТ); Фомін О.В., д.т.н., професор (ДУІТ); Богом'я В.І., Заслужений винахідник України, д.т.н., професор (Київський університет інтелектуальної власності та права); (ДУІТ); Сагін С.В., д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Головань А. І., к.т.наук, доцент (Одеський національний морський університет); Варбанець Р.А., д.т.н., професор (Одеський національний морський університет); Чимшир В.І., д.т.н., професор (директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»); Оніщенко О.А., Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Кравченко Ю.В., д.т.н., професор (Київський національний університет імені Т.Г. Шевченка); Гасанов Юсиф Надир огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Гасанов Вагіф Хажан огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Садигов Вюгар Боюкага огли., к.т.н., доцент (Азербайджанська Державна Морська Академія)

Відповідальний секретар редколегії – Левченко О.В. к.е.н., доцент (ДУІТ)

Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Державного університету інфраструктури та технологій (протокол № 6 від 08.02.2024 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23216-13056ПР від 23.02.2018 р.

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б», спеціальності – 271, 275), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата з технічних наук/доктора філософії (Наказ Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 № 1643).

ЗМІСТ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Маранов О.В., Носовський А.А.

Формалізація процесу ідентифікації надводних об'єктів при вирішенні завдань автоматизації керування судном на основі нейромережевої моделі 6

Васалатій Н.В., Терновський В.Б.

Розрахунки швидкостей течій в окремих районах мексиканської затоки, як важливої складової безпечної навігації судна 14

Калініченко Є.В., Томчаковський Г.Г., Колєсник О.В., Оберто Сантана Л.Е.

Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден 27

Корбан Д.В., Бурмака І.О.

Радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів у складних умовах атмосферного середовища з використанням поляризаційної селекції луна-сигналів 35

Тимочко О.І., Тимощук О.М., Руденко В.М., Сітков О.М.

Ситуаційна обізнаність операторів берегових центрів управління як основна передмова безпечної експлуатації автономних безпілотних суден 49

Гусак І.Л., Ярмач В.Л.

Пропозиції щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії 59

Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубєва С.М.

Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання 69

Сорока В.В. Гороховська О.К.

Практичне застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень 83

Шапіро Г.В., Боріна М.В.

Проведення оцінки ступеня обґрунтованості прийняття рішень при використанні методів і системи інформаційного забезпечення судноводіння 92

Голіков В.В., Сінюта К.О.

Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: перспективи розвитку 104

Головань А.І.

Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден 112

Врублевський Р.Є., Дзигар А.К., Сатулов А.І., Волкова А.С.

Зниження викидів po_x завдяки використанню водно-паливної емульсії приготовленої розробленим роторно-пульсаційним апаратом 124

Шевченко А.П., Штрибець В.В., Маннапова О.В., Рященко О.І.

Моделювання процесів подавання водно-паливних емульсій у судових дизельних двигунах 137

Войченко Т.О., Трофименко А.О., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я.

Метод розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використанні інтелектуальних агентів 145

Войченко Т.О., Шевченко А.П., Трофименко А.О., Тришин В.В.

Контролер перерозподілу потужності для зменшення коливання навантаження на мережу судна..... 152

Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов В.М., Іваненко В.М.

Методика розробки каскадної моделі розрахунку координат судна на основі глибокого навчання 159

Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дорофєєва З.Я., Лісовський С.В.

Дослідження керуючих впливів електрообладнання електричної мережі на режим напруги в системі взаємодії «берег – судно» 169

Трофименко І.В., Пліта Л.Л., Федунов В.М., Іваненко В.М.

Методика побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання 177

Мельник О.В.

Дослідження експлуатаційної надійності технічних засобів як фактор підвищення безпеки при проведенні судових операцій 186

Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М.

Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження 193

Сагін А.С., Сагін С.В.

Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів 206

Сагін С.С., Сагін С.В.

Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден 215

Дудченко С.В., Литовченко В.І.

Удосконалення методу формування безпечного оптимального за часом руху
маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов..... 226

Гаценко Л.В.

Дослідження параметрів контролю та діагностування радіоелектронних систем
засобів водного транспорту 237

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

Медведєва О.Ю., Строєнко Н.Г., Катрич А.В., Швайка М.О.

Прищеплення культури академічної доброчесності майбутнім фахівцям водного
транспорту 243

Медведєва О.Ю., Строєнко Н.Г., Катрич А.В.

Розвиток мовленнєвих компетентностей майбутніх моряків під час
позааудиторної роботи 251

Цюпа А.М., Матвійчук О.В.

Зародження, розвиток та досягнення річкового суднобудування в Україні
(1823-1963 роки)..... 260

АВТОРИ ВИПУСКУ 273

Маранов О.В., Носовський А.А.

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАВДАНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ СУДНОМ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ

Метою роботи є розробка підходів, що забезпечують автоматизовану ідентифікацію надводних морських об'єктів в режимі реального часу шляхом формалізації процесу ідентифікації на основі нейромережевої моделі. Мета статті досягається вирішенням проблеми автоматизованої ідентифікації морських об'єктів на основі згорткових нейронних мереж. Запропонований метод ідентифікації, який має у своєму складі визначення параметрів ідентифікації, спрямованих на вирішення завдань судноводіння та забезпечення безпеки мореплавства. В рамках розгляду процесу ідентифікації морські об'єкти були класифіковані з урахуванням їх важливості та потенційної небезпеки для судноводіння. Під час дослідження було виявлено, що кращим варіантом для вирішення завдання ідентифікації надводних морських об'єктів є згорткова нейронна мережа. Використання такої нейронної мережі дозволяє ефективно обробляти зображення та автоматично виділяти характеристики, які допомагають в ідентифікації. Цей підхід може значно полегшити процес роботи судноводіїв та підвищити рівень безпеки на морі. У підсумку реалізований алгоритм ідентифікації, визначення параметрів та використання згорткової нейронної мережі дозволили створити потужний інструментарій для ідентифікації морських надводних об'єктів. Впровадження цього підходу може сприяти покращенню безпеки мореплавства та ефективності роботи судноводіїв в умовах різних морських ситуацій. Метод ідентифікації базується на згорткових нейронних мережах (CNN). Метод ідентифікації був протестований на наборі даних зображень морських об'єктів. До набору даних входили зображення різних типів морських об'єктів, таких як судна, рибальські судна, маяки та інші. Метод ідентифікації був здатний правильно ідентифікувати більшість об'єктів на зображеннях, навіть у складних умовах, таких як низька освітленість або туман. Наведений метод ідентифікації морських об'єктів може зробити значний внесок у підвищення безпеки мореплавства. Метод може допомогти судноводіям уникати зіткнень з іншими суднами та іншими об'єктами на морі. Метод також може допомогти судноводіям приймати кращі рішення у складних морських ситуаціях.

Ключові слова: автоматизована ідентифікація, обстановка, морські об'єкти, згорткові нейронні мережі, судноводіння, безпека мореплавства, зображення, класифікація.

Постановка проблеми. У різних ситуаціях під час керування судном капітан стикається з завданням визначення об'єктів на морі для вибору маневру, що дозволить безпечно уникнути взаємодії з визначеним об'єктом. Згідно з резолюцією МАРПОЛ А477, радарна система повинна визначити швидкість та координати об'єкта, що наближається, протягом часу не більше трьох хвилин.

Сучасні наукові дослідження в морській галузі пов'язані з визначенням елементів аналізу руху цілей (ЕАРЦ) та розробкою методів визначення форми і розмірів морських об'єктів на основі відбитого радіолокаційного сигналу. До таких методів належать метод розщеплення функції для визначення об'єктів за їх власними електромагнітними коливаннями, неперервне хвильове перетворення для отримання градієнтів зображення, обробка зображення за

допомогою морфологічних фільтрів та інші методи, що базуються на обробці радіолокаційних спостережень. Ці методи дозволяють сформувати контур морської цілі на екрані радара.

Сучасні судна оснащені навігаційними автоматизованими комплексами (НАК), які визначають положення судна за допомогою радіонавігаційних засобів і дозволяють максимально автоматизувати навігаційні операції. Як складова частина НАК, системи автоматичного радіолокаційного прокладання (САРП) використовуються для підвищення безпеки мореплавства, надаючи навігатору постійну інформацію про елементи аналізу руху цілей. У портах створені центри управління рухом суден (ЦУРС) та моніторингові центри на узбережжях морських районів, обладнані автоматизованими інформаційними системами (АІС) для автоматичного збору інформації про судна.

На сьогодні ідентифікація морських об'єктів не є автоматизованою і здійснюється навігатором на основі даних аналізу руху цілей від НАК. Звісно, це залежить від кваліфікації навігатора та є суб'єктивною складовою. Таким чином, завдання автоматизованої ідентифікації об'єктів на маршруті судна є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досить значну кількість робіт у даний час присвячено вивченню проблем використання методів та моделей машинного навчання, а також безпосередньо нейронних мереж для оцінки та ідентифікації надводних об'єктів [1 - 7].

Наприклад, у статті [1] розглядається система запобігання зіткненням, яка є однією з основних систем МАПС (морських автономних поверхневих суден). Система запобігання зіткненням була перевірена за допомогою експериментів на основі сценаріїв. Проте сценарії перевірки були розроблені на основі COLREG (Міжнародних правил запобігання зіткненням суден у морі) або є випадковими. Тому метою цього дослідження є виявлення та систематизація об'єктивних навігаційних сценаріїв для валідації алгоритмів автономного запобігання зіткненням суден. Був використаний підхід, заснований на даних, для збору 12-місячних даних автоматичної системи ідентифікації на західному морі Кореї, для визначення траєкторії судна та ієрархічної кластеризації даних відповідно до навігаційних ситуацій. Отже, отримано ієрархію навігаційних ситуацій та частоту виникнення кожної навігаційної ситуації для суден, які рухалися біля західного узбережжя Кореї протягом року. Очікується, що результати будуть використовуватися при розробці середовища для тестування запобігання зіткненням для МАПС.

У статті [2] визначено, що однією з головних завдань при реалізації автономних суден є розробка ефективних технологій запобігання зіткненням. Автономні судна повинні бути більш освідомленими про ситуацію, щоб виявляти інші судна, передбачати їх майбутні наміри та оцінювати відповідний ризик зіткнення. Одним із кроків до досягнення цієї мети є точне передбачення траєкторій інших суден. У цій статті оцінюється підхід на основі даних для прогнозування траєкторій суден на часовому горизонті від 5 до 30 хвилин за використання історичних даних AIS. Досліджується метод пошуку сусідів для однієї точки, що ґрунтується на кластеризації, а також новий метод видобутку множинних траєкторій. Прогнози були здійснені за допомогою цих методів та порівняні з методом постійної швидкості. Крім того, для оцінки передбачуваних маршрутів суден використовується метод видобутку множинних траєкторій.

У статті [3] наведено результати експериментальних оцінок автономної навігації та запобігання зіткненням при маневрах судна з використанням інтелектуального управління. Для цього проводилися маневри корабля на експериментальній установці, що складалася з навігаційно-управляючої платформи та моделі судна, де була втілена математична формула. Математичний опис експериментальної установки поданий у трьох основних розділах: система моніторингу та інформування про рух суден, система запобігання зіткненням та система управління судном. Фізична система експериментальної установки складається з двох основних частин: моделі судна та платформи навігації та управління. Модель судна представляє собою масштабований корабель, який використовувався у даному дослідженні. Платформа навігації та управління була використана для керування моделлю судна та складалася з апаратної структури та архітектури програмного забезпечення. Фізична система використовувалась для проведення маневрів судна в експериментах з автономною навігацією та запобіганням зіткненням. Крім

того, у дослідженні розглядаються кілька ситуацій запобігання зіткненням з двома суднами. Модель судна розглядається як судно (тобто власне судно), що приймає рішення/дії щодо запобігання зіткненням, і моделюється друге судно (тобто цільове судно), яке не вживає жодних заходів для запобігання зіткненню. Завершуючи, у цьому дослідженні також наведено успішні експериментальні результати щодо декількох ситуацій запобігання зіткненням з двома суднами.

У статті [4] пропонується новий підхід, що базується на глибокому навчанні з підсиленням (DRL), для автоматичного запобігання зіткненням кількох суден, особливо у обмежених водах. Детально описані метод навчання та алгоритми запобігання зіткненням суден з урахуванням маневреності суден, людського досвіду та навігаційних правил. Запропонований підхід досліджується не лише за допомогою чисельного моделювання, але й на модельних експериментах з використанням трьох самохідних суден.

У статті [5] запропоновано метод запобігання зіткненням на основі глибокого навчання з підсиленням (DRL) для безпілотного надводного транспортного засобу (USV). Цей підхід застосовний на етапі прийняття рішення щодо запобігання зіткненням, яке визначає, чи необхідно ухилення, і, якщо так, визначає напрямок маневру запобігання. Щоб використовувати можливості візуального розпізнавання глибоких нейронних мереж як інструмент для аналізу складних та багатозначних ситуацій, які зазвичай виникають, запропоновано подання ситуації зіткнення судна у вигляді сітки. Для побудови мережі DRL запропоновано нейромережеву архітектуру та напівмарківську модель процесу прийняття рішень, спеціально розроблену для завдання запобігання зіткненням USV. Запропонована мережа DRL була навчена шляхом багаторазового моделювання запобігання зіткненням. Після процесу навчання мережу DRL впроваджено в експериментах і симуляціях з запобігання зіткненням, щоб оцінити її здатність розпізнавання ситуації та запобігання зіткненням.

У статті [6] представлений комплексний прототип тестової системи для автономних навігаційних систем (ANS). Основними темами є випробування на основі моделювання, взаємодія симулятора та ANS, співпраця з виробниками ANS, створення сценаріїв динамічних випробувань, автоматична оцінка COLREG та досвід співпраці з Норвезьким оборонним відомством (FFI).

У дослідженні [7] був запропонований метод запобігання зіткненням, який кількісно оцінює ризик зіткнення, а потім генерує шлях запобігання. Спочатку для оцінки ризику зіткнення був запропонований метод оцінки ризику зіткнення, що базується на місцезнаходженні судна та найближчій точці наближення (CPA). CPA використовується для кількісної оцінки ризику зіткнення. Подальше був запропонований алгоритм генерації шляху на основі глибокого навчання з підсиленням (DRL) для визначення часу ухилення та створення шляху ухилення для найбільш небезпечного судна з точки зору ризику зіткнення. Інформація про власне судно та цільове судно, така як місцезнаходження, швидкість, курс, ризик зіткнення, використовується як вхідний стан. Функція вартості, пов'язана зі слідуванням по шляху та запобіганням зіткненням, визначається як винагорода за метод запобігання зіткненням на основі DRL. Крім того, визначені режими DRL для навігації по гнучкому шляху запобіганням шляхом зміни співвідношення між слідуванням по шляху та запобіганням зіткненням. Для перевірки запропонованого методу порівняно метод запобігання зіткненням з алгоритмом A*, який є традиційним алгоритмом планування шляху, та проаналізували результати для різних сценаріїв.

Метою роботи є розробка підходів, що забезпечують автоматизовану ідентифікацію надводних морських об'єктів в режимі реального часу шляхом формалізації процесу ідентифікації на основі нейромережевої моделі.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проведено формалізацію завдання в розглянутій предметній області відповідно до такої послідовності етапів:

– формується набір параметрів, за якими будуть ідентифіковані морські надводні об'єкти, та їх класифікація, тобто об'єднання ряду подібних об'єктів у великі класи;

– на основі сформованого набору параметрів підготовлюється вхідний набір даних для навчання нейромережевої моделі, а в залежності від кількості класів об'єктів – вихідний набір, де кожен рядок вхідного набору даних відповідає конкретному об'єкту класу згідно з запропонованою класифікацією.

Формалізація задачі класифікації виглядає таким чином. Об'єкт, який ідентифікується, описується параметрами $p_1, \dots, p_n$. Об'єкти класифіковані на M класів об'єктів $C_1, \dots, C_m$. Вектор p характеризує спостережуваний об'єкт $\vec{p}(p_1, \dots, p_n)$. За допомогою вектору p нам потрібно вирішити, до якого класу віднести об'єкт, тобто вибрати c_i , до якого належить об'єкт, описаний набором параметрів p . Розв'язання задачі можна представити у вигляді вектора $\vec{c}(C_1, \dots, C_m)$, де виконуються умови

$$\sum_{i=1}^M c_i = 1, \quad 0 \leq c_i \leq 1; \quad (1)$$

де c_i – ймовірність того, як об'єкт відноситься до класу C_i .

Для розв'язання задачі ідентифікації були взяті характеристики ЕАРЦ та електронної картографічної системи, які також подальше використовуватимуться в програмному комплексі. Наприклад, як параметри можуть виступати такі характеристики ЕАРЦ: курс k , швидкість v , дистанція виявлення d , відносна довжина ехо-сигналу l , та відносна ширина ехо-сигналу m . Також в якості розрахункових величин можуть бути взяті, наприклад, прискорення a та кутова швидкість ω , які обчислюються як найбільші зміни швидкості та курсу за період часу від початку спостереження до моменту розрахунку параметрів. Корисними даними для розв'язання задачі ідентифікації також є глибина h в районі виявлення та відстань до найближчого узбережжя b , які можуть бути взяті з електронної карти.

У дослідженні ідентифікація морських об'єктів виконується за допомогою розробленого програмного комплексу на основі навченої нейромережевої моделі, де кожний об'єкт, що спостерігається, характеризується вектором параметрів, наведених в табл. 1.

Таблиця 1 – Вектор параметрів моделі нейронної мережі, що навчається

№	Позначення	Найменування параметра	Одиниці виміру	Опис параметра
1	v	Швидкість	вуз	Найбільша швидкість, що розвивається об'єктом під час спостереження
2	a	Прискорення	вуз/мін	Найбільша зміна швидкості, досягнута об'єктом під час спостереження
3	ω	Кутова швидкість	градус/с	Найбільша зміна курсу об'єкта під час спостереження
4	d	Відстань виявлення	морська миля	Відстань, на якому був виявлений об'єкт
5	l	Відносна довжина ехо-сигналу	-	Відношення довжини ехо-сигналу об'єкта на радарі до шкали радіолокаційної дальності
6	m	Відносна ширина ехо-сигналу	-	Відношення ширини ехо-сигналу об'єкта на радарі до шкали радіолокаційної дальності
7	q	Якість ехо-сигналу	%	Відносна характеристика, що визначає якість ехо-сигналу на радарі
8	h	Глибина	м	Глибина в зоні виявлення об'єкта
9	b	Відстань до берега	морська миля	Відстань від об'єкта до берегової лінії

Усі надводні морські об'єкти типу "судно" були розділені на великі класи, кожен з яких містить великий набір об'єктів. Розподіл на класи виконано з урахуванням поведінки, розмірів та характеру руху об'єктів. Великотоннажні судна з високою швидкістю, такі як вантажні судна, танкери, хімовози, газовози тощо, об'єднані в клас "вантажні судна". Середні судна з високою швидкістю об'єднані в клас "контейнеровози", а судна для риболовлі – в "риболовецькі судна". Човни, яхти, катера об'єднані в клас "малі судна".

У табл. 2 представлені характеристики об'єктів класів "судно" з описом набору об'єктів, що входять до них.

Таблиця 2 – Характеристики об'єктів класів "судно"

№	Найменування класу	Позначення	Характеристики	Набір об'єктів
1	Вантажні судна	C_1	Великотоннажні, з високою швидкістю	Балкери, танкери, хімовози, газовози і т.д.
2	Контейнеровози	C_2	Середні, з високою швидкістю	Контейнерні судна
3	Риболовецькі судна	C_3	Для риболовлі	Траулери, сейнери, шхуни та ін.
4	Малі судна	C_4	Малі, з середньою та малою швидкістю	Човни, яхти, катера та ін.

Інші класи надводних морських об'єктів, що не є судном, але має значення для безпечного судноводіння, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики об'єктів класів "не судно"

№	Найменування класу	Позначення	Набір об'єктів
1	Повітряні апарати	C_5	Авіаційні апарати, що літають на низькій висоті і можуть потрапити в зону дії радару, такі як гідролітаки, інші літаки невеликих розмірів, гелікоптери
2	Окремі плавучі об'єкти	C_6	Малі об'єкти, що перебувають на поверхні води та вільно дрейфують, такі як сміття, бочки, контейнери та ін.
3	Стаціонарні навігаційні об'єкти	C_7	Буї, радіобуї, радіолокаційні маяки та ін.
4	Елементи ландшафту	C_8	Острови, півострови, миси, засихаючі ділянки берегової лінії та ін.
5	Метрологічні явища	C_9	Хмари нижнього шару, дощі, що можуть потрапити в зону дії радару

Для навчання нейронної мережі, що розв'язує задачу ідентифікації об'єктів, необхідно зібрати й підготувати вхідні набори даних для кожного класу. Кожен навчальний набір є численними спостереженнями, для яких зазначено значення вхідних змінних і вихідних функцій.

В якості базового математичного апарату запропоновано використання згорткових нейронних мереж (ЗНМ). Математичні моделі, структури та властивості ЗНМ для ідентифікації надводних об'єктів мають у своєму складі вдосконалені методи обробки й аналізу зображень. ЗНМ є важливим класом глибоких нейронних мереж, що спеціалізується на обробці даних, що мають просторову структуру, такі як зображення та відео. Основна архітектура ЗНМ містить такі компоненти:

1. Згорткові шари (Convolutional Layers) – використовують згортки для виявлення локальних ознак на зображенні. Кожний нейрон у цьому шарі взаємодіє з невеликим підмножинами пікселів зображення.

2. Шари пулінгу (Pooling Layers) – використовуються для зменшення просторового розміру зображення, зберігаючи важливі інформаційні ознаки. Широко використовується максимальний пулінг, де вибирається найважливіший піксель з кожного блоку.

3. Повнозв'язані шари (Fully Connected Layers) – використовуються для об'єднання ознак, виявлених в попередніх шарах, і здійснення остаточної класифікації.

4. Функції активації (Activation Functions). Для введення нелінійності в мережі використовуються функції активації, такі як ReLU (Rectified Linear Activation) або Sigmoid.

Однією з важливих властивостей ЗНМ є спільне використання ваг (weight sharing), коли одна і та ж вага (згортка) використовується для виявлення певної ознаки в різних областях зображення. Це дозволяє мережі більш ефективно виявляти ознаки незалежно від їх місця на зображенні.

Структури та архітектури ЗНМ можуть бути різними, в залежності від конкретної задачі. Деякі з популярних архітектур включають LeNet, AlexNet, VGG, ResNet та інші.

Безпосередньо в статті було використано архітектуру ResNet. ResNet (Residual Neural Network) – це архітектура глибоких нейронних мереж, яка вирішує проблему зникнення градієнта (vanishing gradient problem) у великих мережах за допомогою впровадження блоків з відхиленнями (residual blocks). Приклад архітектури ResNet, яка була використана в статті, наведено на рис. 1 [8].

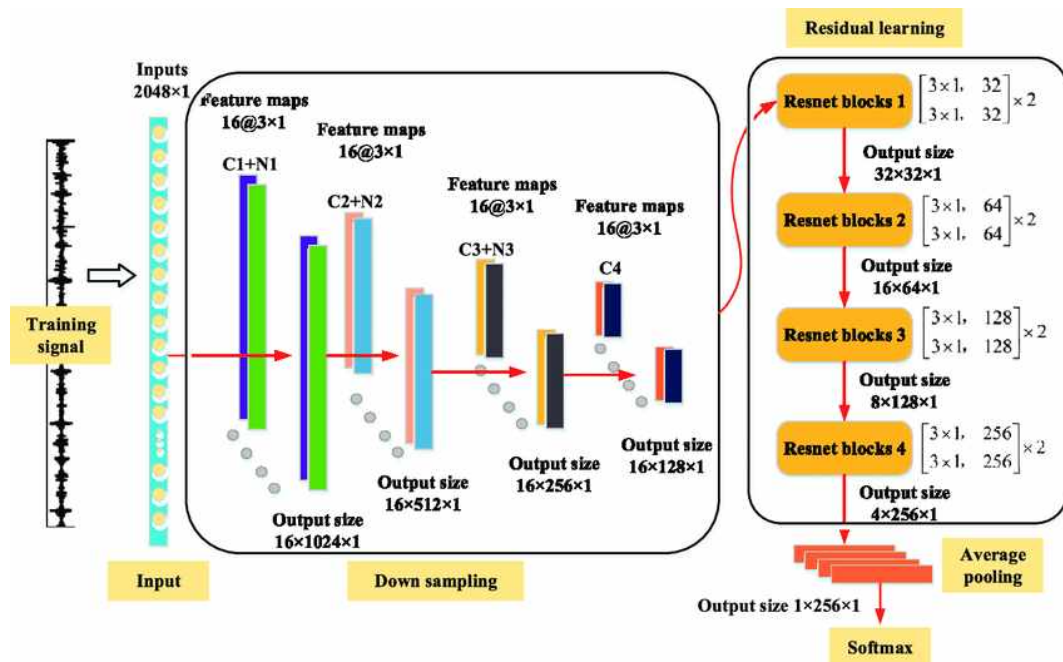


Рисунок 1 – Приклад архітектури ResNet

У стандартних нейронних мережах, для побудови глибокої архітектури, використовуються послідовні шари, наприклад

$$output = W_n(W_{\{n-1\}}(\dots(W_2(W_1(input))\dots))), (2)$$

де W_i – матриця ваг, яка застосовується на i -му шарі;

$input$ – вхідний вектор.

Архітектура ResNet використовує блоки з відхиленнями, що дозволяють зберігати інформацію про вхід і додавати її до виходу після ваг. Формула для блоку з відхиленнями виглядає так:

$$output = input + F(W(input)), (3)$$

де F – функція, яка застосовується до входу;

W – матриця ваг, яка здійснює лінійну перетворення;

$input$ – вхідний вектор.

У блоках з відхиленнями використовуються функції активації, такі як ReLU (Rectified Linear Activation), як і у звичайних нейронних мережах.

ResNet є потужною архітектурою для обробки зображень і виявлення ознак. Використовуючи блоки з відхиленнями, вони допомагають запобігти втраті інформації під час глибокого проходження мережі, що робить їх особливо ефективними при вирішенні завдань ідентифікації об'єктів на зображеннях. Резидуальні блоки дозволяють більш ефективно виявляти характеристики надводних об'єктів та виокремлювати їх для подальшої класифікації. Реалізація ResNet дозволяє ефективно виявляти та аналізувати ознаки на зображеннях незалежно від їх розташування на зображенні.

У реалізованій програмі для практичної реалізації на базі мови програмування Python та фреймворку TensorFlow використовувалась архітектура ResNet. Модель була тренована на наборі даних, який містить зображення надводних об'єктів різних класів, з використанням функції втрат та оптимізатора для покращення точності класифікації. Після успішного тренування реалізована модель використовується для визначення класу надводних об'єктів на нових зображеннях з високою точністю.

Для оцінки ефективності програмної реалізації архітектури ResNet для ідентифікації надводних об'єктів було використано набір даних, що містить різні зображення надводних об'єктів, такі як судна, кораблі, буї та інші. Після завершення тренування моделі на цьому наборі даних було проведено тестування на нових невідомих зображеннях надводних об'єктів. Оцінка ефективності включала розрахунок точності класифікації, яка визначає, скільки зображень було правильно ідентифіковано з усього тестового набору. Також проведено аналіз матриці помилок, яка показує, для яких конкретних класів було допущено помилки та наскільки часто це трапляється. Це допомогло виявити особливості роботи моделі для певних класів надводних об'єктів.

Загальна точність класифікації та результати аналізу матриці помилок дали можливість оцінити ефективність програмної реалізації ResNet для ідентифікації надводних об'єктів та визначити її здатність до точного розпізнавання різних класів об'єктів на зображеннях.

Висновки. У даній статті було розроблено пропозиції щодо ідентифікації морських надводних об'єктів на основі глибоких нейронних мереж, які містять визначення параметрів ідентифікації, спрямованих на вирішення завдань судноводіння та забезпечення безпеки мореплавства. У рамках розгляду процесу ідентифікації морські об'єкти були класифіковані з урахуванням їх важливості та потенційної небезпеки для судноводіння. Під час дослідження було виявлено, що найбільш підходящою для розв'язання задачі ідентифікації надводних морських об'єктів є згортоква нейронна мережа. Використання такої нейронної мережі дозволяє ефективно обробляти зображення та автоматично виділяти характеристики, які допомагають в ідентифікації. Цей підхід може значно полегшити процес роботи судноводіїв та підвищити рівень безпеки на морі. У підсумку, реалізований алгоритм ідентифікації, визначення параметрів та використання згорткової нейронної мережі дозволили створити потужний інструмент для ідентифікації морських надводних об'єктів. Впровадження цього підходу може

сприяти покращенню безпеки мореплавства та ефективності роботи судноводіїв в умовах різних морських ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hwang, T.; Youn, I.-H. Navigation Situation Clustering Model of Human-Operated Ships for Maritime Autonomous Surface Ship Collision Avoidance Tests. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1458. <https://doi.org/10.3390/jmse9121458>.
2. Murray B., Perera L. P. A data-driven approach to vessel trajectory prediction for safe autonomous ship operations //2018 Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM). – IEEE, 2018. – С. 240-247.
3. Perera L. P. et al. Experimental evaluations on ship autonomous navigation and collision avoidance by intelligent guidance //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2014. – Т. 40. – №. 2. – С. 374-387.
4. Shen H. et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning //Applied Ocean Research. – 2019. – Т. 86. – С. 268-288.
5. Woo J., Kim N. Collision avoidance for an unmanned surface vehicle using deep reinforcement learning //Ocean Engineering. – 2020. – Т. 199. – С. 107001.
6. Pedersen T. A. et al. Towards simulation-based verification of autonomous navigation systems //Safety Science. – 2020. – Т. 129. – С. 104799.
7. Chun D. H. et al. Deep reinforcement learning-based collision avoidance for an autonomous ship //Ocean Engineering. – 2021. – Т. 234. – С. 109216.
8. Zhuang, Z.; Lv, H.; Xu, J.; Huang, Z.; Qin, W. A Deep Learning Method for Bearing Fault Diagnosis through Stacked Residual Dilated Convolutions. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1823. <https://doi.org/10.3390/app9091823>.

Maranov O., Nosovskyi A.

FORMALISATION OF THE SURFACE OBJECTS IDENTIFICATION PROCESS IN AUTONOMOUS SHIP CONTROL BASED ON NEURAL NETWORK MODEL

The aim of the study is to develop approaches that ensure automated identification of surface marine objects in real time by formalising the identification process based on a neural network model. The aim of the article is achieved by solving the problem of automated identification of marine objects based on convolutional neural networks. The author proposes an identification method that includes determination of identification parameters aimed at solving the problems of navigation and ensuring safety of navigation. As part of the identification process, the marine objects were classified according to their importance and potential danger to navigation. The study found that a convolutional neural network is the best option for solving the task of identifying surface marine objects. The use of such a neural network allows for efficient image processing and automatic extraction of features that help in identification. This approach can greatly facilitate the work of navigators and increase the level of safety at sea. As a result, the implemented identification algorithm, parameterisation, and use of a convolutional neural network allowed us to create a powerful toolkit for identifying marine surface objects. The implementation of this approach can help improve maritime safety and the efficiency of ship operators in various maritime situations. The identification method is based on convolutional neural networks (CNN). The identification method was tested on a dataset of images of marine objects. The dataset included images of various types of marine objects such as ships, fishing boats, lighthouses, and others. The identification method was able to correctly identify most of the objects in the images, even in difficult conditions such as low light or fog. This method for identifying marine objects can make a significant contribution to improving maritime safety. The method can help navigators avoid collisions with other ships and other objects at sea. The method can also help navigators make better decisions in complex maritime situations.

Keywords: *automated identification, environment, marine objects, convolutional neural networks, navigation, maritime safety, image, classification.*

Васалатій Н.В., Терновський В.Б.

РОЗРАХУНКИ ШВИДКОСТЕЙ ТЕЧІЙ В ОКРЕМИХ РАЙОНАХ МЕКСИКАНСЬКОЇ ЗАТОКИ, ЯК ВАЖЛИВОЇ СКЛАДОВОЇ БЕЗПЕЧНОЇ НАВІГАЦІЇ СУДНА

Дана робота присвячена дослідженню циркуляції вод Мексиканської затоки, яка характеризується впливом вихорів і течій «Loop Current», що характерні для затоки і значно впливають на маневрені характеристики судна. Розраховані швидкості геострофічних течій та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій. Швидкість течій розраховувалась в деяких районах затоки, а саме в центральній, північно - східній та західній її частинах.

За відсутності фактичних даних про течії в деяких районах затоки при обрахунках використовувались дані аналізу знесення судна та її гідрологічні і гідрохімічні елементи. Карти просторового розподілу температури, солоності, морської води та просторового розподілу швидкостей течій на розрізах в окремих районах затоки побудовані за допомогою програмного продукту OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017). Розраховані швидкості геострофічних течій можуть бути використані при керуванні судами, так як результати розрахунків швидкості течії по полю щільності схожі зі схемою течій, які побудовано за даними вимірюваних значень їх швидкості і напрямку.

Система течій Мексиканської затоки є однією з найскладніших в світовому океані і включає в себе декілька окремих потоків. Кожен з них має свій характерний напрям та швидкість руху води. Так швидкості течій у центрі східної частини затоки у поверхневому шарі досягають 100 см/с. Швидкість течії, що прямує на захід через банку Кампече, утворюючи північну периферію циклонічного круговороту в затоці, досягає 70 см/с, а в деяких відрізках часу і більше. Загалом, даний район Мексиканської затоки характеризується складною системою течій, яка безперечно, має впливає на поворотливість та швидкість судна, а також викликає бічний його знос. Тому банка Кампаче характеризується знесенням суден та важкими навігаційними умовами.

В роботі, також розглянуто вплив течій на маневрені характеристики судна. Визначені райони, які характеризуються великою кількістю даних щодо знесення суден.

Ключові слова. Мексиканська затока, швидкість течії, солоність, температура, безпечна навігація, керування маневрами судна, метеокарти.

Постановка проблеми. Мексиканська затока характеризується складною системою течій, яка значно впливає на маневрені характеристики судна. Отже, актуальність роботи не викликає сумнівів, так як пов'язана з дослідженням циркуляції вод затоки, що має важливе значення для оцінки впливу течії на маневрені характеристики судна. Як відомо, маса води, що рухається, має щільність у 800-1000 разів більшу за щільність повітря і може генерувати величезні сили. Тому дуже важливо враховувати швидкість і напрямок течії на кожному курсі, та пам'ятати, що Потрібно пам'ятати, що елементи течії – напрям і швидкість — схильні до значних змін, тому дуже важливо враховувати їх показники на кожному курсі. Оскільки на течії значно змінюються інерційні характеристики судна та спотворюється крива циркуляції на поворотах. при плаванні на течії слід контролювати своє місце всіма доступними способами.

Аналіз літературних джерел. Мексиканська затока за своєю гідрологією є одним із найцікавіших районів Світового океану, який привертає увагу дослідників з різних країн. Це пов'язано з тим, що циркуляція її вод дуже складна і не демонструє чіткої місячної або сезонної мінливості; вона складається з багатьох моделей циркуляції, що відбуваються в різних

просторових масштабах і тривають від кількох тижнів до кількох місяців (Monreal-Gómez and Salas-de León, 1997; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Vázquez de la Cerda et al., 2005; Vukovich, 2007; Dubranna et al., 2011; Pérez-Brunius et al., 2013; Zavala-Sansón et al., 2017; Zavala-Sansón, 2019) [18, 29, 23, 24, 10, 22, 25, 26]. Циркуляція та пов'язана з нею мінливість є результатом взаємодії різних процесів у океані на мезомасштабному рівні, в даному районі спостерігається напівпостійна циклонічна циркуляція, яка називається Кампечським круговоротом (Monreal-Gómez and Salas-de León, 1997; Vázquez de la Cerda et al., 2005; Pérez-Brunius et al., 2013), сезонна циркуляція у формі інтенсивної вздовжберегової течії на західній околиці басейну (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Dubranna et al., 2011), і аперіодичне надходження вихорів петлевих струмів (Vidal et al., 1992; Vukovich, 2007; Meza-Padilla et al., 2019) [18, 21, 20, 23, 10, 25, 24, 21.].

Спостереження (Vázquez de la Cerda та ін., 2005; Pérez-Brunius та ін., 2013) і спрощені теоретичні та чисельні дослідження (Zavala-Sansón, 2019) виявили різні характеристики мінливості океану в південній частині Мексиканської затоки. Vázquez de la Cerda et al. (2005) охарактеризував середню циркуляцію та мінливість південної частини затоки, використовуючи супутникові дані про поверхню моря, гідрографічні дані на глибині 425, 800 і 1500 м, а також вимірювання дрейфів і поплавців на глибині 900 м. Вони визначили суттєві закономірності циркуляції в регіоні разом із їхньою сезонною та несезонною мінливістю, часовими варіаціями та можливими пов'язаними впливами, наголошуючи на коловороті Кампече [23, 22, 26].

Pérez-Brunius et al. (2013) проаналізували поверхневу циркуляцію південної частини Мексиканської затоки, використовуючи трирічні дані надводних дрейфувальників, поточних вимірювачів (розгорнутих на глибині 500 і 2000 м) і супутникової альтиметрії. Вони спостерігали важливі впливи петлевих течій на мінливість круговороту Кампече, розмір і розташування якого розмежовані батиметрією регіону, що підтверджує актуальність збереження потенційної завихреності та еквівалентно-баротропної моделі для опису динаміки круговороту [20].

Zavala-Sansón (2019) використовував еквівалентне баротропне моделювання, щоб дослідити формування Кампечського коловороту з огляду на його баротропну вертикальну структуру. Він виявив, що формування круговороту узгоджується з еквівалентно-баротропною динамікою і що воно топографічно обмежене відповідно до форми геострофічних контурів [28].

Мета роботи. На основі даних температури та солоності морської води побудованих на регулярній сітці з кроком 0,125 градуса по широті та довготі, а також даних натурних експедиційних досліджень на різних розрізах, провести розрахунок швидкостей течій та побудувати карти просторового їх розподілу в окремих районах акваторії Мексиканської затоки. Оцінити вплив швидкості та напрямку течії на рух судна.

Основна частина. Вихідними даними у роботі використані матеріали Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) [24, 25, 26]. Вони включають в себе дані про температуру та солоність морської води у період 2008-2015 рр., побудовані на регулярній сітці з кроком 0,125 градуса по широті та довготі а також дані натурних досліджень експедицій (розрізи - північно-східна та центральна частини Мексиканської затоки, (рис. 1).

Карти просторового розподілу температури, солоності, морської води та просторового розподілу швидкостей течій на розрізах в окремих районах затоки побудовані за допомогою програмного продукту OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017). (див. рис.1).

Робота присвячена дослідженню циркуляції вод Мексиканської затоки, для якої характерні і значною мірою впливають на маневрені характеристики судна вихрі і течії «Loop Current». Вона є одним із найцікавіших районів Світового океану з точки зору гідрологічних особливостей. Для акваторія Мексиканської затоки характерні досить складні системи течій, що мають вплив на швидкість судна, поворотливість, та викликає його бічний. Зустрічається дуже багато даних про знос судна саме в цій акваторії. Як відомо, вплив течії пропорційний швидкості судна та його курсу відносно течії. При зустрічній течії коли виникає додатковий

тиск на перо керма, судно краще слухається керма, а при попутній течії керованість значно погіршується.

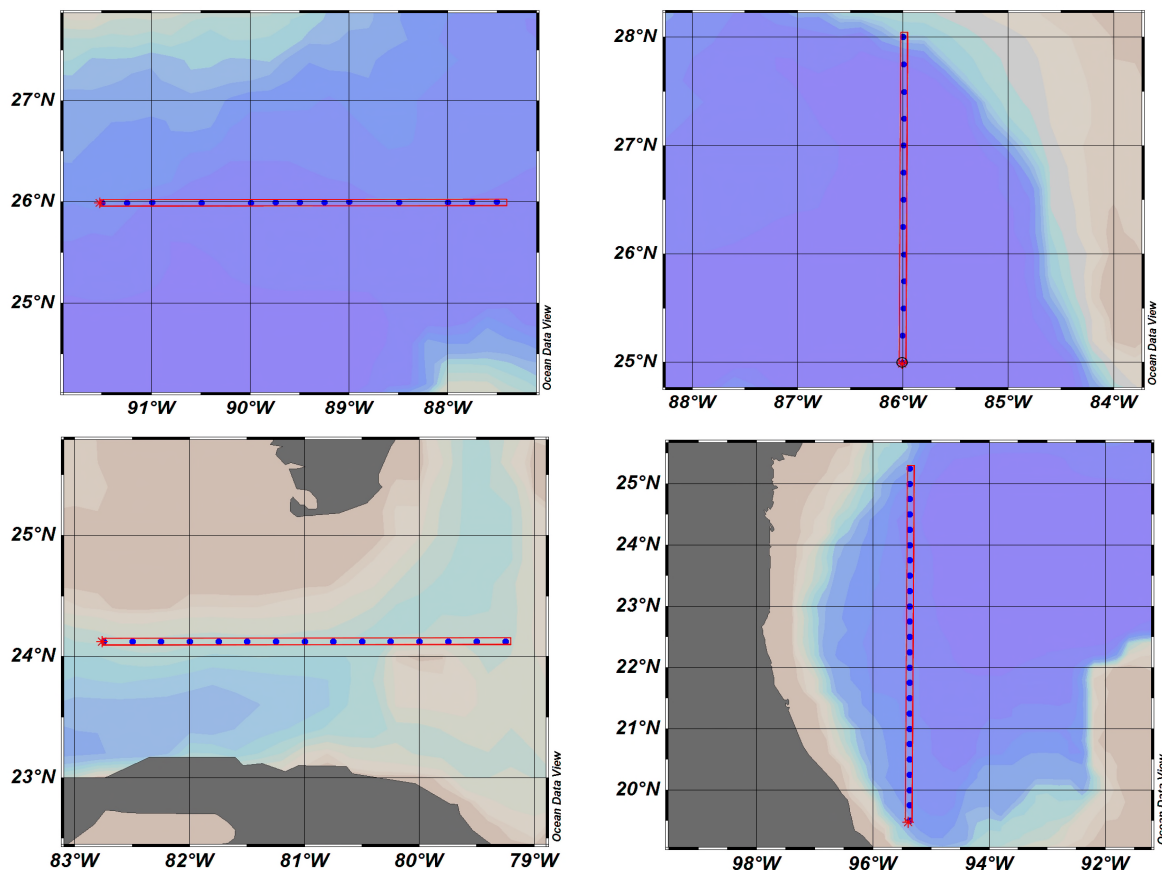


Рисунок 1 - Розташування розрізів в акваторії Мексиканської затоки (програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

Поряд з цим, при керуванні судном слід враховувати елементи припливно-відливних течій, а саме моменти і висоти повної та малої вод. Потрібно заздалегідь розрахувати на термін наміченої проводки судна напрямок та швидкість течій припливно-відливної характеру.

Дуже важливо звертати увагу на зміну курсу судна і враховувати бічний його знос при проході під мостами і при підході до причалів, плаванні фарватерами і по створах, Особливо небезпечний бічний знос на крутих поворотах фарватера під час руху судна за течією. Відцентровою силою інерції посилюється бічне знесення судна, що виникає при його повороті і може призвести до різкого закидання корми судна на зовнішній бік повороту. Також зростання швидкості течії спостерігається у вузкостях, при посиленні вітру та попутної течії.

Отже, при керуванні судном на різних курсах, особливу увагу потрібно приділяти швидкості та напрямку течії і пам'ятати, що дані характеристики схильні до значних змін. При плаванні на течії слід контролювати своє місце всіма доступними способами. На течії значно змінюються інерційні характеристики судна та спотворюється крива циркуляції на поворотах.

Швидкість течій розраховувалась в декількох районах затоки, а саме в центральній, північно - східній та західній її частинах. За відсутності фактичних даних про течії в деяких районах затоки при обрахунках використовувались дані аналізу знесення судна та її гідрологічні і гідрохімічні елементи.

На даний час, активно проводяться глибоководні спостереження за температурою та солоністю морської води. За результатами таких спостережень вдалося виконати розрахунки геострофічних течій в акваторії Мексиканської затоки. Розраховані швидкості геострофічних течій можуть бути використані при керуванні судами, так як результати розрахунків швидкості течії по полю щільності схожі зі схемою течій, які побудовано за даними вимірюваних значень їх швидкості і напрямку.

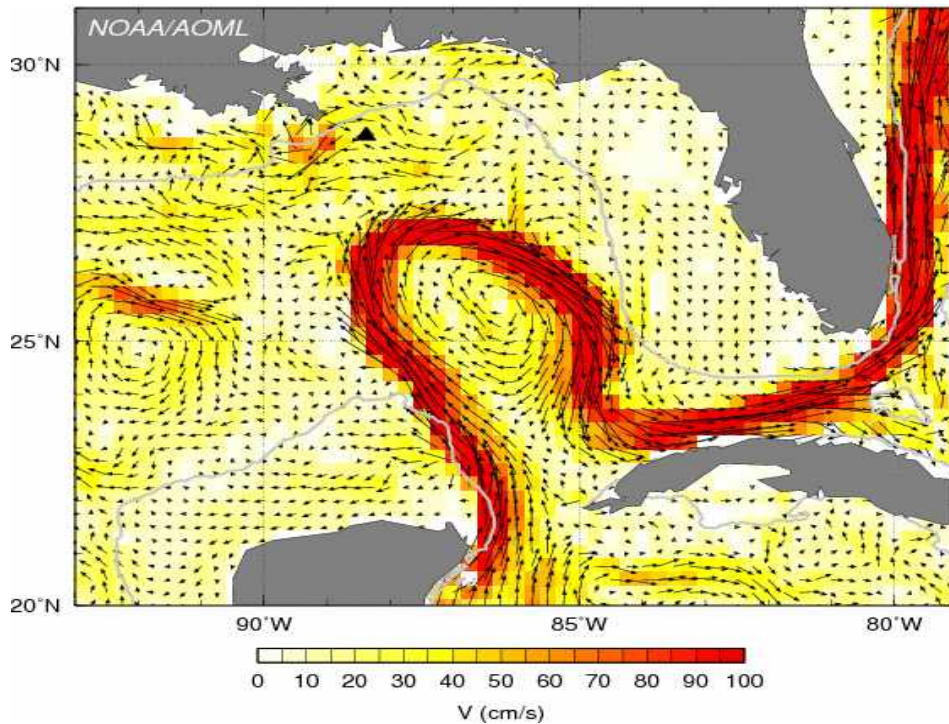


Рисунок 2 - Карта руху поверхневих течій за траскторією синтетичних дрифтерів. [15].

Взагалі, система течій Мексиканської затоки є однією з найскладніших систем у Світовому океані. Течія верхнього шару виходячи з Юкатанської протоки в затоку, ділиться на декілька окремих потоків (рис. 2). Один з них відразу, вздовж Кубинського берега повертає до Флоридської протоки. Інший, у центрі східної частини затоки описує петлю з антициклонічним обертанням води. (рис. 2).

В центрі східної частини затоки у поверхневому шарі води швидкості течії змінюються в межах 75-100 см/с (рис. 5, 8). Швидкість руху води у другому потоці набагато більша в порівнянні першим. Частина його вод, описавши петлю, приєднується до першого потоку і йде у Флоридську протоку, у зв'язку з чим швидкості течії в протоці зростають. Інша частина знову залучається до кругообігу. Цей антициклонічний кругообіг дуже добре простежується за розподілом усіх гідрологічних елементів (температури, солоності, щільності), а також за положенням шару підповерхневої субтропічної води та рельєфу шару максимальних градієнтів температури (рис.6). Третя гілка течії, яка виходить з Юкатанської протоки, спрямована на захід через банку Кампече. Біля західного берега, течія розгалужується. Одна з течій прямує на південь утворюючи в затоці Кампече циклонічний кругообіг. Інша - повертає назад, йде спочатку на схід, а потім (не доходячи до головного антициклонічного круговороту) на північ і утворює другий циклонічний кругообіг у західній частині Мексиканської затоки. Цей великий кругообіг, аналогічно кругообігу в затоці Кампече, добре простежується по розподілу температури та солоності води на кількох верхніх горизонтах. Західна течія, що перетинає банку Кампече, а потім утворює північну периферію циклонічного круговороту в затоці

Кампече, має швидкість близько 70 см/с, а в окремі моменти часу, ймовірно, і більше. Оскільки, у західній частині Мексиканської затоки швидкості течій розраховані за осередненими даними температури та солоності морської води за багаторічний період (2008-2015 рр., березень місяць) на розрізі з кроком 0,125 градуса по широті, швидкості течії спостерігаються нижче (10-15 см/с, рис.11), ніж можуть спостерігатися в окремі сезони року. Третя гілка течії, що виходить з Юкатанської протоки, і прямує на захід через банку Кампече, добре простежується за результатами вимірювань на буйкових станціях і знесення суден, що проходять через банку. Однак, через те, що течія йде по мілководдю, її не можна розраховувати як геострофічну. Між північною периферією циклонічного кругообігу затоки Кампече та південною периферією другого круговороту в його західній частині спостерігається сходження течій та опускання вод. Північний циклонічний кругообіг, який є набагато більшим, знаходиться на тій же широті, що і головний антициклонічний кругообіг у східній частині Мексиканської затоки. Між цими двома кругообігами, а також на північному схилі банки Кампече, існують дрібніші вихори з циклонічним та антициклонічним обертанням, які дуже ускладнюють картину циркуляції вод у цій частині затоки (рис. 2). Отже, банка Кампече характеризується складною системою течій і безпосередньо впливає на швидкість судна, поворотливість, викликає бічний знос судна.

Також відомо, що судно, яке перетинає міліну Кампече, повинно безперервно проводитись вимірювання глибини, оскільки карти цього району застаріли, а нових гідрографічних досліджень не проводилося. Деякі небезпеки на цій ділянці мають стрімкі кромки, які виявляються по товщі і шарах; інші небезпеки розпізнаються за кольором води. Від точки, що знаходиться в 23 милях на північ від мису Каточе ($21^{\circ}36'N$, $87^{\circ}05'W$), судно, що прямує в південно-західну частину Мексиканської затоки, повинно прямувати шляхом 270° доти, доки риф Алакран ($22^{\circ}28' N$, $89^{\circ}43' W$), що знаходиться за 65 миль на N від порту Прогресо ($21^{\circ}16' N$, $89^{\circ}40' W$), не опиниться на траверзі за 10 миль на північ від судна. Необхідно бути обережними, проходячи повз банок, що знаходяться північніше мису Ялькабуль ($21^{\circ}32' N$, $88^{\circ}38' W$). При проходженні цими шляхами потрібно бути дуже уважними і обережними.

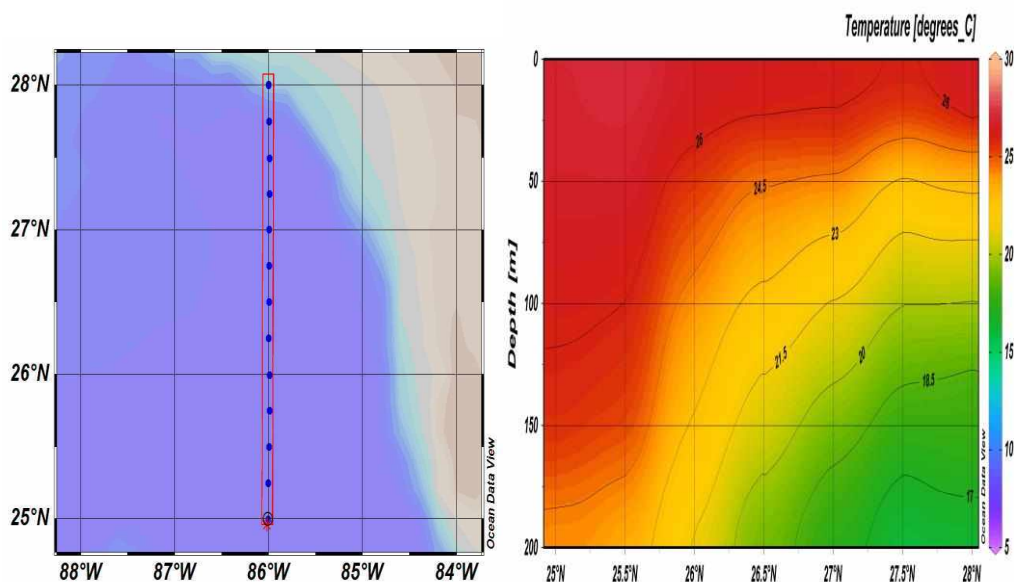


Рисунок 3 - Карта просторового розподілу температури морської води на розрізі в північно-східній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).

(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

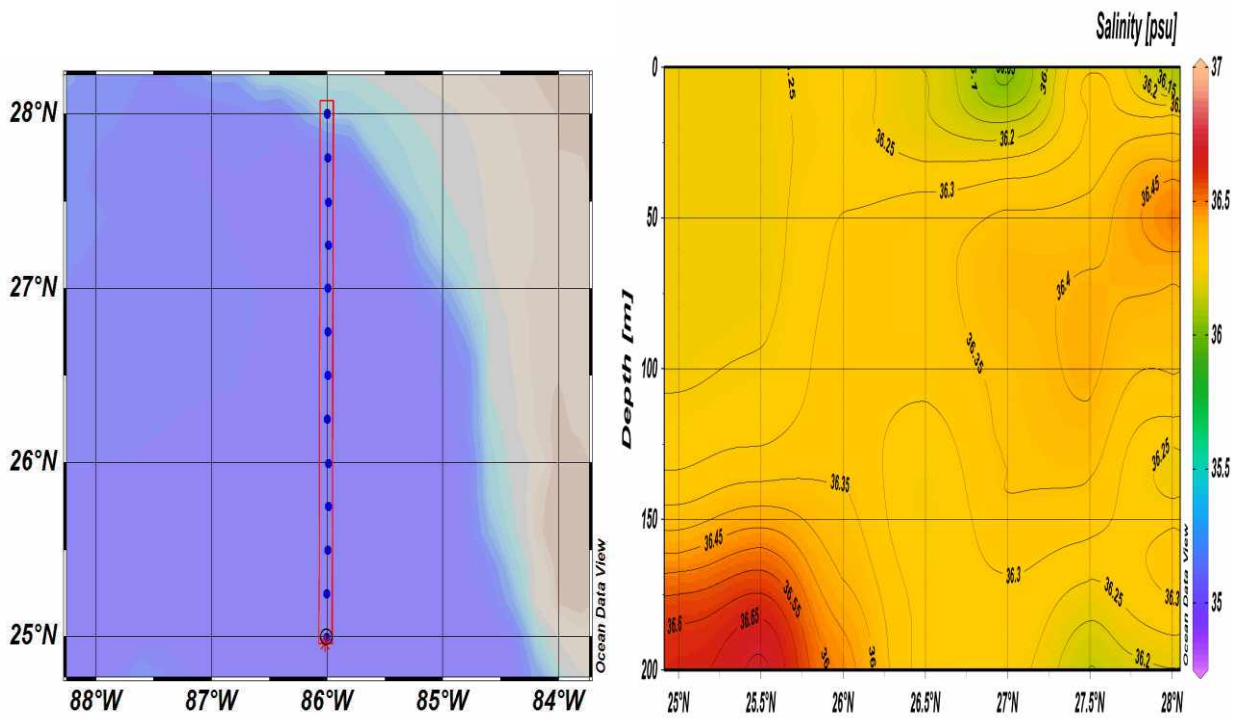


Рисунок 4 - Карта просторового розподілу солоності морської води на розрізі в північно-східній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).
(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

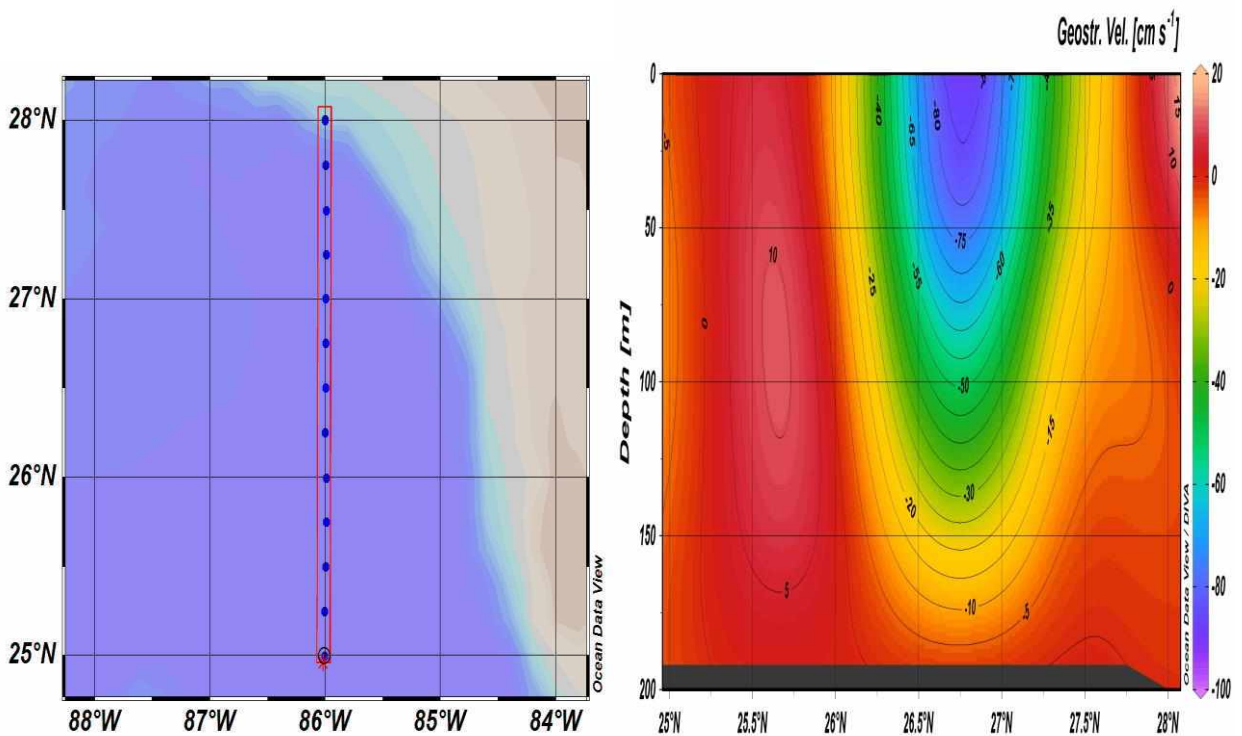


Рисунок 5 - Карта просторового розподілу швидкостей течій на розрізі в північно-східній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).
(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

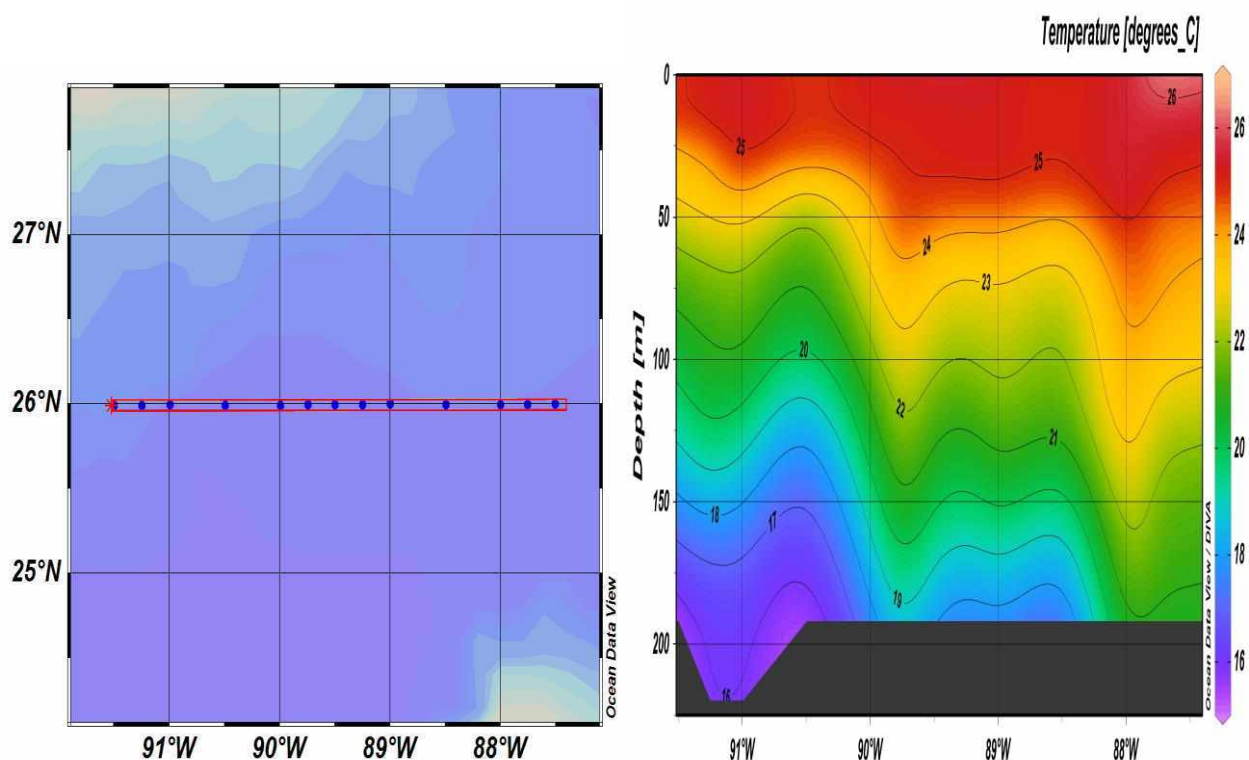


Рисунок 6 - Карта просторового розподілу температури морської води на розрізі в центральній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).

(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

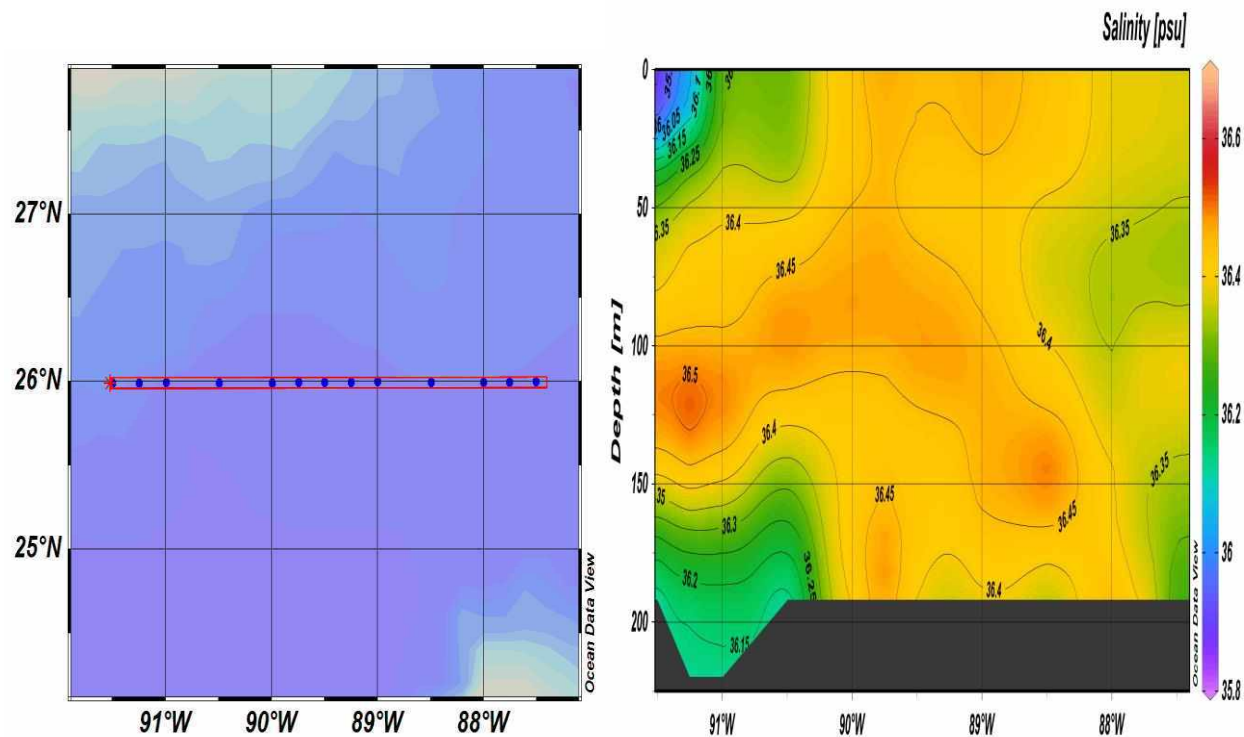


Рисунок 7 - Карта просторового розподілу солоності морської води на розрізі в центральній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).

(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

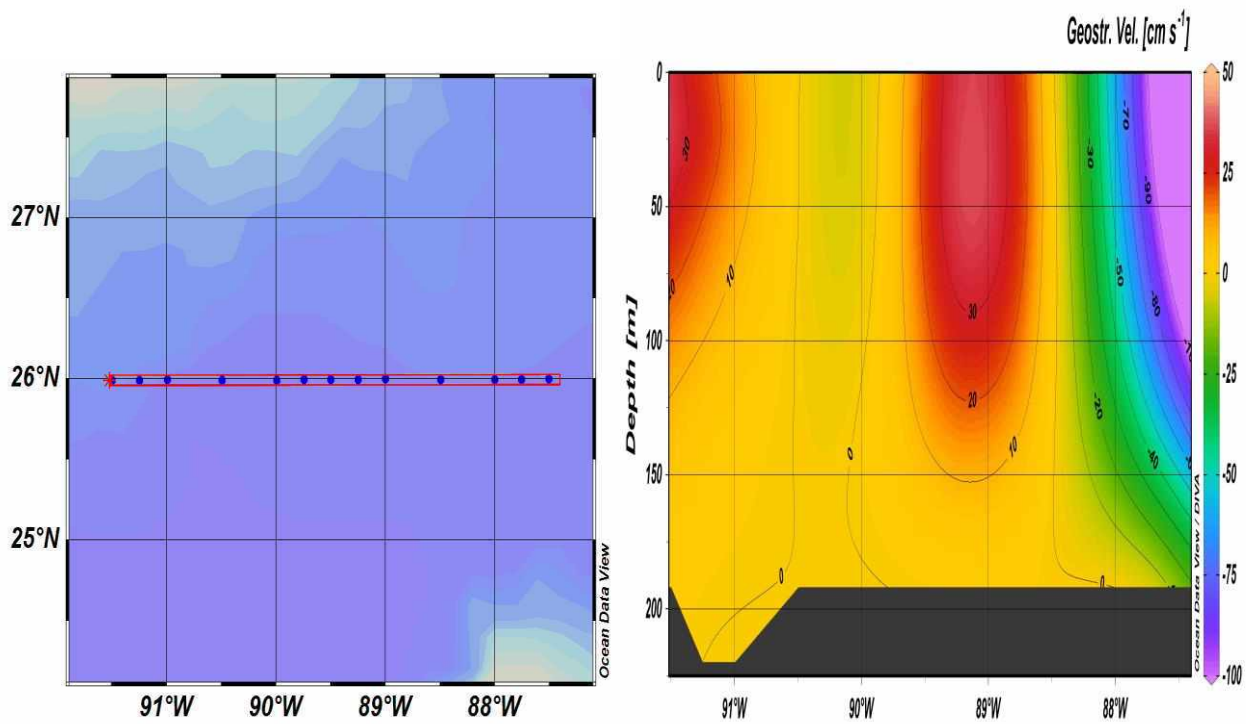


Рисунок 8 - Карта просторового розподілу швидкостей течій на розрізі в центральній частині Мексиканської затоки (травень 2017 р).

(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

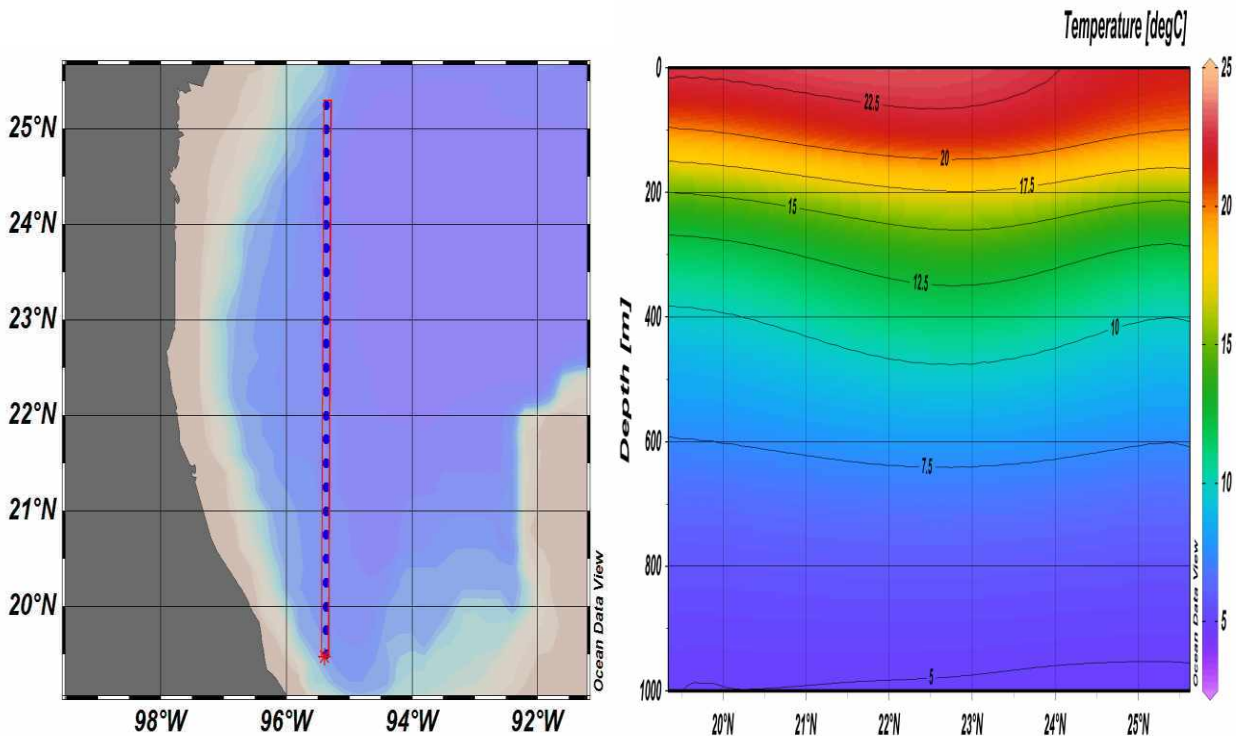


Рисунок 9 - Карта просторового розподілу температури морської води на розрізі у західній частині Мексиканської затоки (березень 2008-2015 рр.).

(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

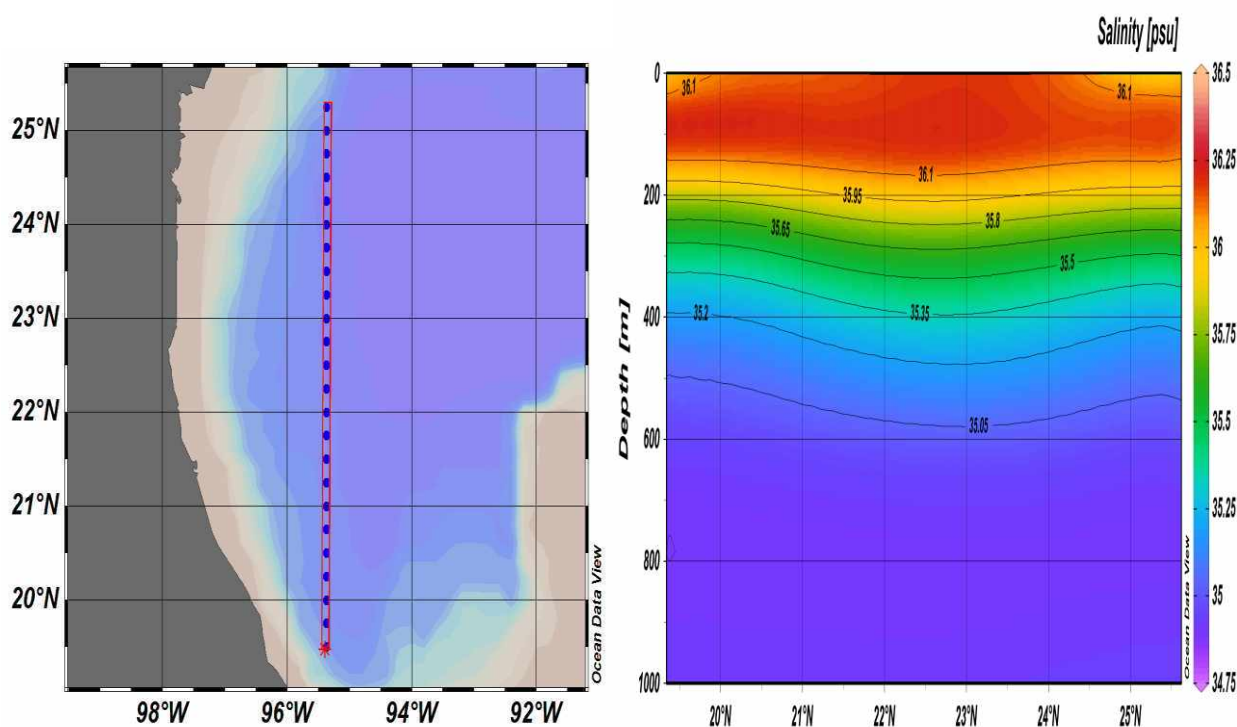


Рисунок 10 - Карта просторового розподілу солоності морської води на розрізі у західній частині Мексиканської затоки (березень 2008-2015 рр.).
(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

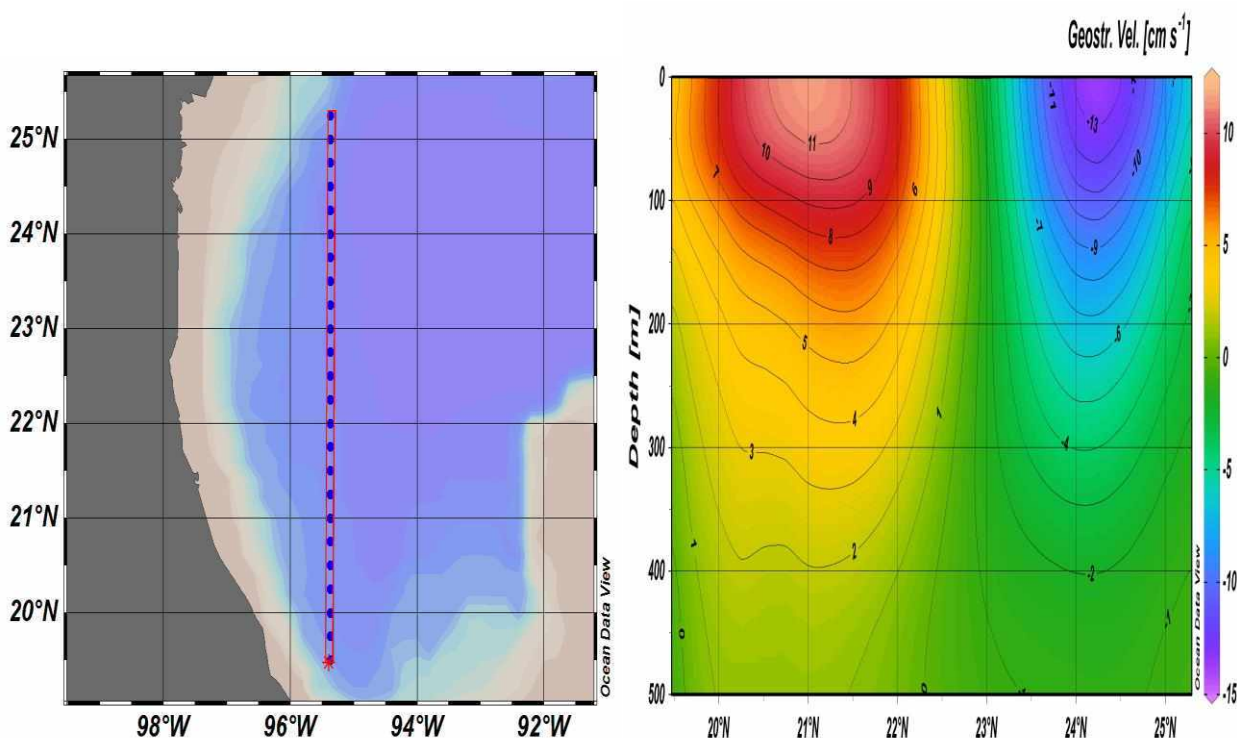


Рисунок 11 - Карта просторового розподілу швидкостей течій на розрізі у західній частині Мексиканської затоки (березень 2008-2015 рр.).
(виконано автором, програмний продукт OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017))

Висновки. В роботі проведені дослідження циркуляції вод Мексиканської затоки та аналіз її гідрологічних умов. Мексиканська затока характеризується дуже складною системою течій, що безпосередньо впливає на швидкість судна, поворотливість, викликає бічний знос судна. Розраховані швидкості та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій, температури і солоності морської води в окремих районах Мексиканської затоки. Визначені райони, які характеризуються великою кількістю даних щодо знесення суден: один з них це банка Кампече, що характеризується складною системою течій. Течія, що йде на захід через банку Кампече, а потім утворює північну периферію циклонічного круговороту в затоці Кампече, характеризується значними швидкостями, що можуть досягати 70 см/с. Аналіз навігаційно-гідрографічних умов показав, що судно, яке перетинає міліну Кампече, повинне безперервно вимірювати глибини, оскільки карти цього району застаріли, а нових гідрографічних досліджень не проводилося.

Швидкості течій у центрі східної частини затоки у поверхневому шарі води змінюються в межах 75-100 см/с.

Таким чином, отримані розрахунки швидкостей течій можуть бути використані при керуванні судами, оскільки геострофічні течії розраховані по полю щільності можна порівняти зі схемою течій, побудованою на підставі вимірюваних значень швидкості і напрямку течій. Також отримані результати можна використовувати при розрахунках навантаження бічної течії, що впливає на швидкість, поворотливість судна, викликає бічний знос.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлов В.І., Кучеренко Н.В. Спеціальні розділи фізичної океанології / Одеса, Екологія, 2011. - 238 с.
2. Суховій В.Ф. Основні риси гідрологічного режиму Атлантичного і тихоого океанів / Суховій В.Ф. – К.: УМК ВО, 1992. – 218с.
3. Суховій В.Ф. Фізична океанологія/Суховій В.Ф.–Одеса:АОБАХВА, 2001. – 315 с.
4. Хойєр Г. Управління судами під час маневрування, 1992. - 101 с.
5. Vukovich, F. M., 1986: Aspects of the behavior of cold perturbations in the eastern Gulf of Mexico: A case study. J. Phys. Oceanogr., 16, 175—188.
6. B. W. Crissman, M. Bushnell and W. J. King, 1979: Some aspects of the oceanography of the Gulf of Mexico using satellite and in situ data. /. Geophys. Res., 84(C12), 7749—7768.
7. Booklet Chart Gulf of Mexico / National Oceanic and Atmospheric Administration / NOAA Chart 411.
8. Brooks, D. A., 1984: Current and hydrographic variability in the northwestern Gulf of Mexico. J. Geophys. Res., 89(C5), 8022- 8032.
9. Brown, M., E. Waddell and R. J. Wayland, 1989: Gulf of Mexico Ship-of-Opportunity Data Rep., update: October 1985-March 1988. OCS Study / MMS 89-0013, 598 pp.
10. Dubranna J., Pérez-Brunius P., López M., Candela J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. J. Geophys. Res.: Oceans 116, C08009. doi: 10.1029/2011JC007007
11. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. Deep Sea Res. Part II: Topical Stud. Oceanogr. 85, 182—194. doi: 10.1016/j.dsr2.2012.07.020
12. Emery, W.J., 2003. Ocean circulation - water types and water masses. In: Holton, J.R. (Ed.), Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Academic Press, pp. 1556-1567.
13. Foreman, M. G. G., 1979: Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Sci. Rep. 78-6, Institute of Ocean Studies, Patricia Bay, Sydney BC, 70 pp.
14. Hofmann, E. E., and S. J. Worley, 1986: An investigation of the circulation of the Gulf of Mexico. J. Geophys. Res., 91(C12), 14 221 — 14 236.

15. Hurlburt, H. E., and J. D. Thompson, 1980: A numerical study of Loop Current intrusions and eddy shedding. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 1611–1651.
16. Hamilton P., Bower A., Furey H., Leben R. R., Pérez-Brunius P. (2016). Deep Circulation in the Gulf of Mexico: A Lagrangian Study. (New Orleans, Louisiana Hamilton 2016: U.S. Dept. of the Interior Bureau of Ocean Energy Management, Gulf of Mexico OCS Region), 289.
17. Kirwan, A. D., W. J. Merrell, Jr., J. K. Lewis and R. E. Whitaker, 1984: Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89(C3), 3417–3424.
- Koopmans, L. H., 1974: The spectral analysis of time series, Academic 353 pp.
18. Monreal-Gómez M., Salas-de León D. (1997). “Circulación y estructura termohalina del Golfo de México,” in *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía, vol. 3. Ed. Lavín-Peregrina M. (Unión Geofísica Mexicana), 183–199.
19. Meza-Padilla R., Enríquez C., Liu Y., Appendini C. M. (2019). Ocean circulation in the Western Gulf of Mexico using self-organizing maps. *J. Geophys. Res.: Oceans* 124, 4152–4167. doi: 10.1029/2018JC014377
20. Pérez-Brunius P., García-Carrillo P., Dubranna J., Sheinbaum J., Candela J. (2013).
21. Vázquez de la Cerda A. M., Reid R. O., DiMarco S. F., Jochens A. E. (2005). “Bay of Campeche circulation: An update,” in *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*. Eds. Sturges W., Lugo-Fernandez A. (American Geophysical Union), 279–293. doi: 10.1029/161GM20
22. Vukovich F. M. (2007). Climatology of ocean features in the Gulf of Mexico using satellite remote sensing data. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 689–707. doi: 10.1175/JPO2989.1
23. Vidal V. M. V., Vidal F. V., Pérez-Molero J. M. (1992). Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.: Oceans* 97, 2155–2172. doi: 10.1029/91JC00486
24. National Centers for Environmental information [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/>
25. National Centers for Environmental information. Ocean Physics. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/products/ocean-physics>
26. Chart Sources [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opencpn.org/OpenCPN/info/chartsources.html>
27. Zavala-Hidalgo J., Morey S. L., O’Brien J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.: Oceans* 108, 3389. doi: 10.1029/2003JC001879
28. Zavala-Sansón L. (2019). Nonlinear and time-dependent equivalent-barotropic flows. *J. Fluid Mechanics* 871, 925–951. doi: 10.1017/jfm.2019.354
29. Zavala-Sansón L., Pérez-Brunius P., Sheinbaum J. (2017). Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environ. Res. Lett.* 12, 024006. doi: 10.1088/1748-9326/aa537c.

REFERENCES

1. Mykhaylov V.I., Kucherenko N.V. *Spetsial’ni rozdil’ny fizychnoyi okeanolohiyi* / Odesa, Ekolohiya, 2011. - 238 s.
2. Sukhovi V.F. *Osnovni rysy hidrolohichnoho rezhymu Atlantychnoho i tykhoho okeaniv* / Sukhovi V.F. – K.: UMK VO, 1992. – 218s.
3. Sukhovi V.F. *Fizychna okeanolohiya* / Sukhovi V.F. – Odesa: AO BAKHVA, 2001. – 315 s.
4. Khoyyer H. *Upravlinnya sudamy pid chas manevruvannya*, 1992. - 101 s.
5. Vukovich, F. M., 1986: Aspects of the behavior of cold perturbations in the eastern Gulf of Mexico: A case study. *J. Phys. Oceanogr.*, 16, 175–188.
6. B. W. Crissman, M. Bushnell and W. J. King, 1979: Some aspects of the oceanography of the Gulf of Mexico using satellite and in situ data. *J. Geophys. Res.*, 84(C12), 7749–7768.

7. Booklet Chart Gulf of Mexico / National Oceanic and Atmospheric Administration / NOAA Chart 411.
8. Brooks, D. A., 1984: Current and hydrographic variability in the northwestern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89(C5), 8022–8032.
9. Brown, M., E. Waddell and R. J. Wayland, 1989: Gulf of Mexico Ship-of-Opportunity Data Rep., update: October 1985–March 1988. OCS Study / MMS 89—0013, 598 pp.
10. Dubranna J., Pérez-Brunius P., López M., Candela J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.: Oceans* 116, C08009. doi: 10.1029/2011JC007007
11. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep Sea Res. Part II: Topical Stud. Oceanogr.* 85, 182–194. doi: 10.1016/j.dsr2.2012.07.020
12. Emery, W.J., 2003. Ocean circulation - water types and water masses. In: Holton, J.R. (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, pp. 1556–1567.
13. Foreman, M. G. G., 1979: Manual for tidal currents analysis and prediction. *Pacific Marine Sci. Rep.* 78-6, Institute of Ocean Studies, Patricia Bay, Sydney BC, 70 pp.
14. Hofmann, E. E., and S. J. Worley, 1986: An investigation of the circulation of the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 91(C12), 14 221 — 14 236.
15. Hurlburt, H. E., and J. D. Thompson, 1980: A numerical study of Loop Current intrusions and eddy shedding. *J. Phys. Oceanogr.* 10, 1611–1651.
16. Hamilton P., Bower A., Furey H., Leben R. R., Pérez-Brunius P. (2016). Deep Circulation in the Gulf of Mexico: A Lagrangian Study. (New Orleans, Louisiana Hamilton 2016: U.S. Dept. of the Interior Bureau of Ocean Energy Management, Gulf of Mexico OCS Region), 289.
17. Kirwan, A. D., W. J. Merrell, Jr., J. K. Lewis and R. E. Whitaker, 1984: Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89(C3), 3417–3424. Koopmans, L. H., 1974: The spectral analysis of time series, Academic 353 pp.
18. Monreal-Gómez M., Salas-de León D. (1997). “Circulación y estructura termohalina del Golfo de México,” in *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía, vol. 3 . Ed. Lavín-Peregrina M. (Unión Geofísica Mexicana), 183–199.
19. Meza-Padilla R., Enríquez C., Liu Y., Appendini C. M. (2019). Ocean circulation in the Western Gulf of Mexico using self-organizing maps. *J. Geophys. Res.: Oceans* 124, 4152–4167. doi: 10.1029/2018JC014377
20. Pérez-Brunius P., García-Carrillo P., Dubranna J., Sheinbaum J., Candela J. (2013).
21. Vázquez de la Cerda A. M., Reid R. O., DiMarco S. F., Jochens A. E. (2005). “Bay of Campeche circulation: An update,” in *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models*. Eds. Sturges W., Lugo-Fernandez A. (American Geophysical Union), 279–293. doi: 10.1029/161GM20
22. Vukovich F. M. (2007). Climatology of ocean features in the Gulf of Mexico using satellite remote sensing data. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 689–707. doi: 10.1175/JPO2989.1
23. Vidal V. M. V., Vidal F. V., Pérez-Molero J. M. (1992). Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.: Oceans* 97, 2155–2172. doi: 10.1029/91JC00486
24. National Centers for Environmental information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/>
25. National Centers for Environmental information. Ocean Physics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/products/ocean-physics>
26. Chart Sources [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://opencpn.org/OpenCPN/info/chartsource.html>
27. Zavala-Hidalgo J., Morey S. L., O’Brien J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.: Oceans* 108, 3389. doi: 10.1029/2003JC001879

28. Zavala-Sansón L. (2019). Nonlinear and time-dependent equivalent-barotropic flows. *J. Fluid Mechanics* 871, 925–951. doi: 10.1017/jfm.2019.354
29. Zavala-Sansón L., Pérez-Brunius P., Sheinbaum J. (2017). Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environ. Res. Lett.* 12, 024006. doi: 10.1088/1748-9326/aa537c.

Vasalatii N.V., Ternovsky V.B.

CALCULATION OF THE CURRENTS SPEED IN CERTAIN AREAS OF THE GULF OF MEXICO AS AN IMPORTANT COMPONENT OF SHIP SAFETY NAVIGATION.

This work is devoted to the study of the circulation of the waters of the Gulf of Mexico, which is characterized by the influence of eddies and currents "Loop Current", which are characteristic of the gulf and significantly affect the maneuvering characteristics of the vessel. Geostrophic currents' speed were calculated and maps of the spatial distribution of currents' speed were constructed. The speed of currents was calculated in some areas of the bay, namely in its central, north-eastern and western parts.

In the absence of actual data on the currents in some areas of the bay, data from the analysis of the ship's demolition and its hydrological and hydrochemical elements were used in the calculations. Maps of the spatial distribution of temperature, salinity, sea water, and the spatial distribution of current velocities on sections in separate areas of the bay were constructed using the OCEAN DATA VIEW software product (Version 4.7.10 - 2017). The calculated speed of geostrophic currents can be used in ship management, as the results of calculations of the current velocity in the density field are similar to the scheme of the currents, which are constructed based on the data of the measured values of their speed and direction.

The current system of the Gulf of Mexico is one of the most complex in the world ocean and includes several separate currents. Each of them has its own characteristic direction and speed of water movement. Thus, current speeds in the center of the eastern part of the bay in the surface layer reach 100 cm/s. The speed of the current heading west through the Campeche bank, forming the northern periphery of the cyclonic gyre in the gulf, reaches 70 cm/s, and in some periods even more. In general, this area of the Gulf of Mexico is characterized by a complex system of currents, which undoubtedly affects the maneuverability and speed of the vessel, and also causes its lateral wear. Therefore, the Campeche Bank is characterized by shipwrecks and difficult navigation conditions.

In the work, the influence of currents on the maneuvering characteristics of the vessel is also considered. Areas characterized by a large amount of data on shipwrecks have been identified.

Keywords. *Gulf of Mexico, currents' speed, salinity, temperature, safety navigation, control of vessel maneuverability, meteorological maps.*

Калініченко Є.В., Томчаковський Г.Г., Колеснік О.В., Оберто Сантана Л.Е.

МІНІМІЗАЦІЯ РИЗИКІВ ЗАБРУДНЕННЯ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ТАНКЕРНИМ ФЛОТОМ: АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

У цій статті проводиться всебічний аналіз технічних і технологічних чинників, що мають першорядне значення для мінімізації ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом. Дослідження охоплює широкий спектр питань, включно з конструктивними особливостями танкерів, системами запобігання аварійним ситуаціям, а також сучасними методами збору та ліквідації забруднень, що виникають під час транспортування нафтопродуктів та інших небезпечних речовин. Особливий акцент робиться на заходах щодо запобігання витокам і аваріям, таких як використання подвійних корпусів, систем моніторингу стану судна та аварійного реагування. Крім того, у статті висвітлюються передові технологічні рішення, зокрема, системи виявлення забруднень і автоматизованого управління, що сприяють підвищенню ефективності та безпеки експлуатації танкерного флоту. Акцентується увага на важливості розроблення та впровадження екологічно стійких та інноваційних технологій у танкерному секторі з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення безпечного транспортування вантажів. У статті також пропонуються рекомендації щодо вдосконалення екологічної безпеки танкерного флоту на основі передових практик та інноваційних рішень. Загалом, ця стаття являє собою цінне аналітичне дослідження технічних і технологічних аспектів, спрямованих на зниження ризиків забруднення морського середовища в процесі експлуатації танкерного флоту.

Ключові слова: танкерний флот, забруднення морського середовища, екологічна безпека, витoki нафтопродуктів, системи запобігання аваріям, технології ліквідації розливів, інноваційні рішення.

Постановка проблеми. Танкерний флот відіграє ключову роль у забезпеченні глобальної енергетичної безпеки, здійснюючи транспортування нафти і нафтопродуктів морським шляхом. Однак експлуатація танкерів пов'язана з серйозними екологічними ризиками, головним з яких є потенційне забруднення морського середовища в результаті аварійних розливів, витоків та інших інцидентів. Наслідки таких подій можуть бути катастрофічними для морських екосистем, біорізноманіття, прибережних зон і місцевих громад. Для мінімізації ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом необхідний комплексний підхід, що ґрунтується на застосуванні передових технічних і технологічних рішень на всіх етапах життєвого циклу танкерів – від проектування і будівництва до експлуатації та утилізації. Це вимагає тісної співпраці та координації зусиль усіх зацікавлених сторін – судновласників, операторів, суднобудівельних підприємств, постачальників устаткування, класифікаційних товариств, регулюючих органів і науково-дослідних інститутів [1].

Мета даної роботи полягає у проведенні всебічного аналізу наявних технічних і технологічних рішень, спрямованих на мінімізацію ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом, оцінюванні їхньої ефективності і виявленні перспективних напрямків подальшого розвитку. Для досягнення поставленої мети в статті вирішуються такі завдання: аналіз конструктивних особливостей сучасних танкерів та їхнього впливу на екологічну безпеку; розгляд систем запобігання аваріям і витокам на танкерному флоті; дослідження технологій і методів збирання та ліквідації нафтових розливів; оцінка ефективності наявних

технічних і технологічних рішень; виявлення невирішених проблем і перспективних напрямів розвитку; розробка рекомендацій щодо вдосконалення екологічної безпеки танкерного флоту.

Основна частина. Конструктивні особливості сучасних танкерів та їхній вплив на екологічну безпеку. Конструкція танкерів відіграє одну з ключових ролей у забезпеченні екологічної безпеки під час транспортування нафти і нафтопродуктів морським шляхом. Сучасні танкери мають відповідати суворим міжнародним стандартам і вимогам, спрямованим на мінімізацію ризиків аварій і витоків.

Одним із найважливіших конструктивних елементів сучасних танкерів є подвійний корпус. Наявність другого, внутрішнього корпусу істотно знижує ризик розливу нафти в разі пошкодження зовнішнього корпусу під час зіткнення, посадки на мілину або інших інцидентів. Згідно зі статистичними даними, використання танкерів з подвійним корпусом дало змогу скоротити кількість великих розливів нафти на понад 90% порівняно з танкерами без подвійного корпусу [2].

Ще однією важливою конструктивною особливістю сучасних танкерів є системи моніторингу та контролю стану корпусу і вантажних танків. Ці системи містять різні датчики і сенсори, що дають змогу в режимі реального часу відстежувати рівень і температуру вантажу, тиск у танках, наявність витоків та інші параметри. Отримані дані аналізуються спеціальним програмним забезпеченням і в разі виявлення відхилень або потенційних ризиків негайно передаються екіпажу і береговим службам для вжиття необхідних заходів [3].

Для запобігання утворенню вибухонебезпечних сумішей у вантажних танках сучасні танкери обладнуються системами інертних газів. Ці системи забезпечують подачу в танки інертного газу (зазвичай азоту або димових газів з низьким вмістом кисню), який витісняє кисень і підтримує концентрацію вуглеводнів на безпечному рівні. Застосування систем інертних газів є обов'язковою вимогою для танкерів, що перевозять сиру нафту та інші легкозаймисті вантажі.

Для мінімізації ризиків забруднення атмосфери сучасні танкери оснащуються системами рекуперації парів нафтопродуктів. Ці системи забезпечують збір і конденсацію парів, що утворюються під час навантаження і перевезення вантажу, з подальшим поверненням у вантажні танки або берегові резервуари. Застосування систем рекуперації парів дає змогу скоротити викиди летких органічних сполук на 90-95% і суттєво знизити ризики для здоров'я екіпажу і берегових служб [4].

Таким чином, конструктивні особливості сучасних танкерів, таких як подвійні корпуси, системи моніторингу та контролю, інертні гази і рекуперація парів, відіграють ключову роль у забезпеченні екологічної безпеки під час транспортування нафти і нафтопродуктів. Відповідність танкерів суворим міжнародним стандартам і застосування передових технічних рішень дають змогу мінімізувати ризики аварій, витоків і забруднення морського середовища.

Системи запобігання аваріям і витокам на танкерному флоті. Для запобігання аваріям і витокам на сучасних танкерах застосовується комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки танкерного флоту та мінімізацію ризиків виникнення інцидентів.

Важливим елементом системи запобігання аваріям є застосування систем автоматичної ідентифікації (AIC) та електронних картографічних навігаційно-інформаційних систем (ЕКНІС). AIC забезпечує автоматичний обмін інформацією між суднами і береговими службами про місцезнаходження, курс, швидкість та інші параметри руху танкера. ЕКНІС являє собою інтегровану навігаційну систему, що об'єднує електронні навігаційні карти, дані від радарів, AIC, GPS та інших датчиків. Спільне використання AIC і ЕКНІС дає змогу істотно підвищити ситуаційну обізнаність екіпажу, своєчасно виявляти потенційні загрози і вживати заходів для їх запобігання.

Важливу роль у запобіганні витокам нафтопродуктів відіграють системи виявлення і контролю витоків. Ці системи містять різні датчики і сенсори, встановлені у вантажних танках, насосних відділеннях, кофердах та інших потенційно небезпечних зонах. У разі виявлення витоку система подає сигнал тривоги й автоматично закриває клапани та засувки для

локалізації розливу. Деякі сучасні системи також оснащуються функцією дистанційного керування, що дає змогу оперативно перекачувати вантаж із пошкодженого танка в резервний або аварійний танк. Для оперативного реагування на аварійні ситуації танкери оснащуються системами аварійної зупинки навантаження/розвантаження і системами аварійного відключення насосів та іншого обладнання. Ці системи дають змогу швидко припинити операції з вантажем і запобігти подальшому розвитку аварійної ситуації. Активацію систем аварійної зупинки можна здійснювати автоматично в разі спрацьовування датчиків витoku або перевищення допустимих параметрів, а також вручну за командою екіпажу.

Важливим аспектом запобігання аваріям і витокам є також регулярне технічне обслуговування і ремонт танкерів та їхнього обладнання. Для цього розробляються спеціальні програми технічного менеджменту, що включають періодичні огляди, випробування, калібрування і заміну критично важливих вузлів і агрегатів. Виконання цих заходів дає змогу підтримувати танкери в справному стані, своєчасно виявляти й усувати потенційні несправності та знижувати ризики відмов обладнання.

Таким чином, системи запобігання аваріям і витокам на танкерному флоті є комплексом взаємопов'язаних технічних і організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків інцидентів під час транспортування нафти і нафтопродуктів. Застосування сучасних систем навігації, виявлення витоків, аварійного зупинення і технічного менеджменту дає змогу істотно підвищити рівень екологічної безпеки танкерних перевезень.

Технології та методи збирання і ліквідації нафтових розливів. Незважаючи на вжиті заходи щодо запобігання аваріям і витокам, повністю виключити ризики розливів нафти і нафтопродуктів під час експлуатації танкерного флоту неможливо. Тому важливою складовою забезпечення екологічної безпеки є наявність ефективних технологій і методів збирання та ліквідації нафтових розливів.

Одним із найпоширеніших методів локалізації та збирання нафтових плям на поверхні моря є застосування бонових загороджень. Бонові загородження являють собою плавучі бар'єри, що складаються з поплавців, баласту і непроникної "спідниці", які розгортаються навколо або нижче за течією від місця розливу. Бонові загородження дають змогу обмежити поширення нафтової плями і сконцентрувати її для подальшого збору. Ефективність застосування бонових загороджень залежить від швидкості течії, хвилювання моря та інших чинників. Нині розроблено спеціальні типи бонових загороджень, адаптовані для використання в різних умовах, включно з арктичними водами і районами з сильною течією.

Для безпосереднього збору нафти і нафтопродуктів з поверхні моря застосовуються нафтозбірні системи – скімери. Скімери являють собою плавучі пристрої, оснащені спеціальними щітками, дисками або барабанами, які "зчісують" нафтову плівку з поверхні води і перекачують її в накопичувальні ємності. Існують різні типи скімерів, що відрізняються за принципом дії та продуктивністю. Найефективнішими вважаються олеофільні скімери, які вибірково збирають нафту і нафтопродукти, практично не захоплюючи воду.

Для збирання нафти і нафтопродуктів у прибережній зоні та на мілководді застосовують вакуумні системи і нафтозбирачі-амфібії. Вакуумні системи використовують потужні насоси для всмоктування нафто-водяної суміші та подальшого відділення нафти від води в спеціальних сепараторах. Нафтозбирачі-амфібії являють собою самохідні або буксирні пристрої, які можуть збирати нафту як на воді, так і на суші.

Останніми роками активно розвиваються методи біоремедіації, засновані на використанні мікроорганізмів для прискорення природного розкладання нафти і нафтопродуктів. Біоремедіація здійснюється шляхом внесення в забруднене середовище спеціально вивчених штамів бактерій, здатних використовувати вуглеводні як джерело живлення. Для підвищення ефективності біоремедіації застосовують також біосорбенти та біопрепарати, що містять поживні речовини і стимулятори росту мікроорганізмів. Перспективним напрямком є також розробка і застосування "зелених" сорбентів на основі природних матеріалів, таких як вовна, соломка, торф, хітин тощо. Ці сорбенти мають високу нафтоємність, плавучість і здатність до біорозкладання, що дає змогу використовувати їх без шкоди для навколишнього середовища.

Деякі типи "зелених" сорбентів можуть застосовуватися також для очищення прибережної смуги та берегової лінії від нафтових забруднень [5-6].

Для підвищення ефективності ліквідації великих розливів нафти застосовуються методи контрольованого спалювання нафти на місці. Контрольоване спалювання здійснюється шляхом підпалювання нафтової плями в спеціально відведеному районі з використанням вогнестійких бонових загороджень. За правильного проведення контрольоване спалювання дає змогу швидко видалити значну частину розливої нафти, проте пов'язане з ризиком забруднення атмосфери продуктами горіння.

Важливу роль у забезпеченні ефективності ліквідації розливів відіграє оперативність реагування та наявність достатніх сил і засобів. Для цього в районах інтенсивного судноплавства та видобутку нафти створюються спеціальні аварійно-рятувальні формування, оснащені сучасною технікою та обладнанням. Регулярне проведення навчань і тренувань дає змогу відпрацювати взаємодію різних служб і відомств, а також перевірити готовність сил і засобів до дій у реальній обстановці [7].

Таким чином, сучасні технології та методи збирання та ліквідації нафтових розливів дають змогу істотно знизити екологічний збиток від аварійних ситуацій під час експлуатації танкерного флоту. Подальше вдосконалення цих технологій і методів, а також упровадження інноваційних рішень, таких як "зелені" сорбенти і методи біоремедіації, сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки морських перевезень нафти і нафтопродуктів.

Визначення ефективності наявних технічних і технологічних рішень. Для оцінки ефективності наявних технічних і технологічних рішень, спрямованих на мінімізацію ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом, необхідно проаналізувати їхній вплив на частоту і масштаби аварійних розливів, а також на ступінь готовності до ліквідації наслідків інцидентів.

Статистичні дані свідчать про значне зниження кількості та обсягів розливів нафти і нафтопродуктів з танкерів за останні десятиліття. Так, якщо в 1970-х роках середній обсяг розливів становив близько 300 тис. тонн на рік, то в 2010-х роках цей показник знизився до 3-5 тис. тонн на рік, тобто майже в 100 разів. При цьому кількість великих розливів (понад 700 тонн) скоротилася з 25-30 до 1-2 випадків на рік [8]. Ці позитивні зміни стали можливими завдяки впровадженню подвійних корпусів, систем моніторингу та контролю, поліпшенню навігаційного обладнання та іншим технічним і технологічним рішенням.

Проте повністю виключити ризики аварій і розливів під час експлуатації танкерів неможливо, особливо в складних навігаційних і метеорологічних умовах, а також у разі помилок екіпажу або відмов обладнання. Тому важливим показником ефективності є ступінь готовності до ліквідації розливів, включно з наявністю відповідних планів, технічних засобів і навченого персоналу. За даними Міжнародної асоціації власників танкерів (INTERTANKO), понад 90% компаній-операторів танкерів мають плани ліквідації розливів нафти (Shipboard Oil Pollution Emergency Plan – SOPEP) і регулярно проводять навчання і тренування екіпажів. Крім того, у більшості країн діють національні та регіональні плани реагування на розливи нафти, які передбачають координацію дій різних відомств та організацій [9-10].

Ефективність застосування окремих технологій і методів ліквідації розливів залежить від конкретних умов і характеристик інциденту. Так, за даними Міжнародної організації по боротьбі з розливами нафти (Oil Spill Response Limited – OSRL), за використання бонових загороджень і скімерів в оптимальних умовах вдається зібрати до 80-90% розливої нафти, однак за сильного хвилювання і течії ефективність знижується до 10-20%. Застосування диспергентів дає змогу прискорити природне розсіювання і біорозкладання нафти, але пов'язане з ризиком токсичного впливу на морські організми. Методи контрольованого спалювання забезпечують швидке видалення нафти з поверхні моря, але можуть призвести до забруднення атмосфери й утворення твердих залишків, які потребують подальшої утилізації [11].

Перспективні технології, такі як "зелені" сорбенти та методи біоремедіації, поки що не набули широкого розповсюдження, проте мають значний потенціал для підвищення ефективності ліквідації розливів. Так, за даними лабораторних і польових випробувань, деякі

типи сорбентів на основі природних матеріалів здатні поглинати до 30-50 г нафти на 1 г сорбенту, при цьому зберігаючи плавучість і здатність до біорозкладання. Застосування спеціально підібраних штамів нафтоокислювальних бактерій дає змогу прискорити розкладання нафти в морському середовищі в 2-3 рази порівняно з природними процесами [6].

Важливим фактором, що впливає на ефективність ліквідації розливів, є також своєчасність і достатність фінансування відповідних заходів. За оцінками експертів, витрати на ліквідацію великих розливів можуть сягати сотень мільйонів і навіть мільярдів доларів США. Наприклад, витрати на ліквідацію наслідків розливу нафти з танкера Exxon Valdez у 1989 р. становили близько 2 млрд доларів США, а загальні збитки від інциденту оцінюють у 7-8 млрд доларів США. Для забезпечення фінансування заходів з ліквідації розливів створюють спеціальні компенсаційні фонди, що формуються за рахунок внесків нафтових компаній і вантажовласників, а також державні резервні фонди.

Таким чином, наявні технічні та технологічні рішення загалом забезпечують досить високий рівень екологічної безпеки танкерних перевезень, про що свідчить значне зниження кількості та обсягів розливів нафти і нафтопродуктів за останні десятиліття. Водночас зберігаються ризики аварійних інцидентів, а ефективність ліквідації їхніх наслідків залежить від комплексу чинників, включно з конкретними умовами розливу, своєчасністю реагування, наявністю необхідних сил і засобів, а також достатністю фінансування. Подальше підвищення ефективності наявних рішень і впровадження інноваційних технологій сприятиме мінімізації ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом.

Невирішені проблеми та перспективні напрямки розвитку. Незважаючи на значний прогрес у сфері запобігання забрудненню морського середовища з танкерів, досягнутий за останні десятиліття, зберігається низка проблем, які потребують вирішення для подальшого підвищення екологічної безпеки танкерного флоту.

Однією з ключових проблем є старіння світового танкерного флоту і пов'язане з цим підвищення ризиків аварій і витоків. За даними міжнародних класифікаційних товариств, середній вік танкерів становить близько 10 років, водночас 20% флоту – це судна, старші за 15 років. Старіння флоту призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування і ремонт, а також підвищує ймовірність відмов обладнання та конструктивних елементів. Вирішення цієї проблеми вимагає прискореного оновлення танкерного флоту, будівництва нових суден, що відповідають сучасним екологічним стандартам, а також посилення контролю за технічним станом танкерів, які експлуатуються [12].

Іншою проблемою є необхідність адаптації наявних технологій і методів ліквідації розливів до особливих умов, таких як арктичні води, льодова обстановка, райони з екстремальними погодними умовами тощо. Розливи нафти в цих умовах пов'язані з підвищеними ризиками для навколишнього середовища і становлять особливу складність для ліквідації. Необхідне розроблення спеціальних технічних засобів і методів, що враховують специфіку конкретних районів і умов, а також створення відповідної інфраструктури реагування, включно з базами аварійно-рятувального флоту, складами устаткування і матеріалів, системами моніторингу та зв'язку.

Актуальною проблемою залишається також необхідність удосконалення нормативно-правової бази та механізмів регулювання танкерних перевезень з метою підвищення їх екологічної безпеки. Незважаючи на наявність міжнародних конвенцій і стандартів (МАРПОЛ, СОЛАС та ін.), їхня реалізація на національному рівні не завжди ефективна та послідовна. Необхідний подальший розвиток і гармонізація нормативних вимог, посилення контролю за їх дотриманням, а також підвищення відповідальності всіх учасників перевезень - судовласників, операторів, вантажовідправників та ін.

Серед перспективних напрямів розвитку технологій запобігання забрудненню та ліквідації розливів можна виділити такі:

- Розробка і впровадження "зелених" суден, що використовують екологічно чисті види палива (СПГ, біопаливо, водень) і оснащені гібридними енергетичними установками. Це дасть

змогу знизити викиди в атмосферу і ризики розливів, а також зменшити вуглецевий слід танкерного флоту.

- Створення автономних і дистанційно керованих танкерів, оснащених інтелектуальними системами навігації, моніторингу та аварійного реагування. Застосування таких суден дасть змогу виключити "людський фактор" і підвищити надійність і безпеку танкерних перевезень.

- Розроблення нових типів "зелених" сорбентів і диспергентів на основі природних матеріалів, що мають високу ефективність, селективність і здатність до біорозкладання. Це дасть змогу підвищити ефективність збору нафти і мінімізувати негативний вплив на морські екосистеми.

- Розвиток методів дистанційного зондування і моделювання розливів нафти з використанням супутникових даних, безпілотних літальних апаратів, чисельних моделей і геоінформаційних систем. Це забезпечить оперативність виявлення розливів, прогнозування їх розповсюдження та оптимізацію заходів з ліквідації.

- Створення роботизованих систем і комплексів для ліквідації розливів, здатних працювати в автономному режимі і в складних умовах (льодова обстановка, мілководдя, забруднені береги тощо). Це дасть змогу підвищити ефективність і безпеку ліквідаційних заходів, а також знизити ризики для персоналу.

Реалізація цих та інших перспективних напрямів потребує консолідації зусиль усіх зацікавлених сторін, включно з державними органами, нафтогазовими та судноплавними компаніями, науково-дослідними організаціями, громадськими об'єднаннями тощо. Необхідні значні інвестиції в дослідження і розробки, а також створення сприятливих умов для впровадження інноваційних рішень, включно з правовим регулюванням, економічним стимулюванням, підготовкою кадрів і розвитком інфраструктури.

Рекомендації щодо вдосконалення екологічної безпеки танкерного флоту. На основі проведеного аналізу технічних і технологічних аспектів забезпечення екологічної безпеки танкерного флоту можна запропонувати низку рекомендацій щодо подальшого вдосконалення в цій галузі:

- 1) Прискорення оновлення світового танкерного флоту і виведення з експлуатації суден, які не відповідають сучасним екологічним стандартам. Для цього необхідні заходи економічного стимулювання, такі як пільгове кредитування "зелених" суден, диференціація портових зборів і податків залежно від екологічного класу судна тощо.

- 2) Підвищення ефективності контролю за технічним станом танкерів, включно з впровадженням ризик-орієнтованого підходу до інспектування суден і обладнання, використання дистанційних методів моніторингу та діагностики, а також посилення відповідальності класифікаційних товариств і судновласників за забезпечення безпечної експлуатації танкерів.

- 3) Удосконалення систем управління екологічною безпекою на танкерному флоті, включно з впровадженням інтегрованих систем менеджменту (ISM Code), проведенням регулярних аудитів та інспекцій, підвищенням кваліфікації та відповідальності персоналу, а також розвитком корпоративної культури екологічної безпеки.

- 4) Розширення міжнародного співробітництва в галузі запобігання забрудненню та ліквідації розливів з танкерів, включно з обміном інформацією та передовим досвідом, проведенням спільних навчань і тренувань, створенням регіональних центрів реагування та матеріально-технічних баз, а також розвитком транскордонної взаємодії під час ліквідації інцидентів.

- 5) Удосконалення нормативно-правової бази та механізмів регулювання танкерних перевезень, включно з ратифікацією та імплементацією міжнародних конвенцій на національному рівні, гармонізацією вимог до конструкції та обладнання танкерів, посиленням санкцій за порушення та забруднення навколишнього середовища, а також розвитком економічних інструментів стимулювання екологічно відповідального судноплавства.

- 6) Розвиток наукових досліджень і розробок у сфері екологічно чистих технологій для танкерного флоту, включно з використанням альтернативних видів палива, оптимізацією

гідродинамічних характеристик суден, створенням ефективних систем очищення баластних вод і відходів, а також розробленням нових методів і засобів ліквідації розливів нафти.

7) Підвищення рівня підготовки та кваліфікації екіпажів танкерів і берегового персоналу, включно з упровадженням спеціалізованих програм навчання і тренажерної підготовки, проведенням регулярних навчань і тренувань, обміном досвідом і найкращими практиками, а також розвитком міжнародних стандартів компетентності.

8) Посилення взаємодії та координації між різними учасниками танкерних перевезень, включно із судноплавними компаніями, портовою владою, аварійно-рятувальними службами, природоохоронними органами та громадськими організаціями. Для цього необхідне створення ефективних механізмів обміну інформацією, спільного планування та ухвалення рішень, а також чіткий розподіл функцій і відповідальності.

Реалізація запропонованих рекомендацій дасть змогу підвищити рівень екологічної безпеки танкерного флоту, мінімізувати ризики аварійних розливів нафти та інших забруднювальних речовин, забезпечити своєчасне й ефективне реагування на інциденти, а також знизити негативний вплив танкерних перевезень на морське середовище. Це потребуватиме консолідації зусиль і ресурсів усіх зацікавлених сторін, а також політичної волі та послідовних дій на міжнародному та національному рівнях.

Висновки. Проведений аналіз технічних і технологічних аспектів забезпечення екологічної безпеки танкерного флоту засвідчив, що досягнуто значного прогресу в галузі запобігання забрудненню морського середовища з танкерів, про що свідчить істотне зниження аварійності та обсягів розливів за останні десятиліття. Цьому сприяло впровадження інноваційних конструктивних рішень (подвійні корпуси), вдосконалення систем виявлення і контролю витоків, розвиток методів і технологій ліквідації розливів, а також посилення міжнародних і національних вимог до безпеки танкерних перевезень.

Водночас зберігаються серйозні ризики аварійних розливів нафти та інших забруднюючих речовин з танкерів, особливо в районах інтенсивного судноплавства, екологічно вразливих акваторіях і за несприятливих погодних умов. Актуальними проблемами залишаються старіння світового танкерного флоту, необхідність адаптації технологій ліквідації розливів до складних умов, недостатня ефективність нормативно-правового регулювання та контролю за дотриманням екологічних вимог, а також дефіцит кваліфікованих кадрів і обмеженість фінансових ресурсів для забезпечення екологічної безпеки.

Серед перспективних напрямів подальшого розвитку технологій запобігання забрудненню та ліквідації розливів із танкерів можна виокремити створення "зелених" суден на екологічно чистих видах пального, розроблення автономних і роботизованих систем для моніторингу та ліквідації розливів, упровадження інтелектуальних систем підтримки ухвалення рішень і тренажерної підготовки екіпажів, а також розвиток методів дистанційного зондування та моделювання розливів нафти.

Для ефективного розв'язання проблеми мінімізації ризиків забруднення морського середовища танкерним флотом необхідне об'єднання зусиль усіх зацікавлених сторін, включно з державними органами, нафтогазовими та судноплавними компаніями, науково-дослідними організаціями та громадськими об'єднаннями. Пріоритетними напрямками спільної діяльності мають стати: оновлення танкерного флоту та його приведення у відповідність до сучасних екологічних стандартів; удосконалення нормативно-правової бази та механізмів регулювання; розвиток міжнародного співробітництва та обміну передовим досвідом; підвищення рівня підготовки та кваліфікації персоналу; розширення наукових досліджень і розробок у сфері екологічно чистих технологій.

Реалізація запропонованих у статті рекомендацій сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки танкерного флоту, зниженню ризиків аварійних розливів і забезпеченню сталого розвитку морських перевезень нафти і нафтопродуктів. Це дасть змогу мінімізувати негативний вплив на морське середовище, зберегти біорізноманіття та екосистемні функції океану, а також забезпечити довгострокові інтереси всіх учасників морегосподарської діяльності.

Подальші дослідження в галузі екологічної безпеки танкерного флоту мають бути спрямовані на розвиток методів оцінювання та прогнозування екологічних ризиків, розроблення інноваційних технологій і стандартів у сфері проектування, будівництва та експлуатації танкерів, удосконалення методів ліквідації розливів у складних умовах, а також на аналіз і впровадження передових практик забезпечення екологічної безпеки на морському транспорті.

REFERENCES

1. Schachter O., Serwer D. Marine Pollution Problems and Remedies. *American Journal of International Law*. 1971. Vol. 65, no. 1. P. 84–111. URL: <https://doi.org/10.2307/2199296>
2. Effects of Double-Hull Requirements on Oil Spill Prevention: Interim Report | *The National Academies Press*. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/9131>.
3. Marine Oil Tankers: Understanding the Technologies and Safety Measures Behind Shipping Crude Oil at Sea. *Orbitshub*. URL: <https://orbitshub.com/marine-oil-tankers-2/>.
4. Kamel, Merhane, and Khalid Al Shehhi. "VOC Recovery System for Crude Oil Tanker Loading." Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, October 2022. URL: <https://doi.org/10.2118/210906-MS>
5. Jørgensen K.S., Kreutzer A., Lehtonen K.K., Kankaanpää H., Rytönen J., Wegeberg S., Dussaubat M., Cachot J., Eljarrat E., Barceló D., et al. The EU Horizon 2020 Project GRACE: Integrated Oil Spill Response Actions and Environmental Effects. *Environ. Sci. Eur.* 2019;31:44. doi: 10.1186/s12302-019-0227-8.
6. Jaak Truu. Oil Biodegradation and Bioremediation in Cold Marine Environment. *Microorganisms*. 2023 May; 11(5): 1120. Published online 2023 Apr 25. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/11/5/1120>
7. Emergency Response | Clean Harbors. *Environmental and Industrial Services | Clean Harbors*. URL: <https://www.cleanharbors.com/services/industrial-field-services/emergency-response>.
8. ITOF – Promoting Effective Response And Technical Services To Marine Spills - Cleaner Seas. *Cleaner Seas*. URL: <https://www.cleanerseas.com/itopf-promoting-effective-response-and-technical-services-to-marine-spills/>.
9. INTERTANKO – International Association of Independent Tanker Owners / Международная Ассоциация независимых владельцев танкеров (ИНТЕРТАНКО). *Международные и Морские Организации*. URL: <http://xn--h1ahbi.com.ua/info/49-intertanko-international-association-of-independent-tanker-owners-mezhdunarodnaya-associaciya-nezavisimyh-vladelcev-tankerov-intertanko.html>.
10. SHIPBOARD OIL POLLUTION EMERGENCY PLAN (SOPEP) In accordance with Regulation 37 of Annex I of MARPOL 73/ 78. URL: https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180227_184504_zec_ZMMO_.SOPEP_Sample_Plan.pdf
11. Oil Spill Response Limited – global oil spill response specialists | Oil Spill Response. URL: <https://www.oilspillresponse.com/>.
12. Inari Helle, Jussi Mäkinen, Maisa Nevalainen, Mawuli Afenyo, and Jarno Vanhatalo. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective. *Environmental Science & Technology* 2020 54 (4), 2112-2121 DOI: 10.1021/acs.est.9b07086 URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.9b07086>
13. Understanding Oil Spills And Oil Spill Response. *Oil Program Center / United States Environmental Protection Agency / Office of Emergency And Remedial Response*. December 1999. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-01/documents/ospguide99.pdf>
14. White, H., R. Conmy, I. MacDonald, AND C. Reddy. Methods of Oil Detection in Response to the Deepwater Horizon Oil Spill. *OCEANOGRAPHY*. Oceanography Society, Rockville, MD, 29(3):76-87, (2016). URL: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.72>
15. Robert Byrne. *The impact of oil spills Research Briefing*. National Assembly for Wales Senedd

Research. April 2019. URL: <https://research.senedd.wales/media/h32fiwbv/022-web-english.pdf>

16. Responding To Oil Spills. | Clear Seas. URL: <https://clearseas.org/oil-spill-response/>.

17. IMO. International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC). – London: IMO, 1990.

Kalinichenko Ye.V., Tomchakovsky G.G., Koliesnik O.V., Oberto Santana L.E.

MINIMISING THE RISKS OF MARINE POLLUTION FROM THE TANKER FLEET: ANALYSIS OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

This article provides a comprehensive analysis of the technical and technological factors that are of paramount importance for minimising the risks of marine pollution from the tanker fleet. The study covers a wide range of issues, including the design features of tankers, emergency prevention systems, and modern methods of collecting and eliminating pollution arising from the transport of oil products and other hazardous substances. Particular emphasis is placed on measures to prevent leaks and accidents, such as the use of double hulls, ship monitoring and emergency response systems. In addition, the article highlights advanced technological solutions, such as pollution detection and automated control systems, which contribute to the efficiency and safety of the tanker fleet. The article emphasises the importance of developing and implementing environmentally sustainable and innovative technologies in the tanker sector in order to minimise the negative impact on the environment and ensure the safe transportation of goods. The article also offers recommendations for improving the environmental safety of the tanker fleet based on best practices and innovative solutions. Overall, this article is a valuable analytical study of the technical and technological aspects aimed at reducing the risks of marine pollution in the course of tanker fleet operation.

Keywords: tanker fleet, marine pollution, environmental safety, oil product leaks, accident prevention systems, spill response technologies, innovative solutions.

УДК 551.508.85 (551.576 +551.577)

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.04

Корбан Д.В., Бурмака І.О.

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДНИХ УМОВАХ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СЕЛЕКЦІЇ ЛУНА-СИГНАЛІВ

У статті теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено методологію використання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають на траєкторії руху судна в складних умовах атмосферного середовища судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом. Показано, що використання дійсних енергетичних параметрів Стокса, дає змогу здійснити розпізнавання луна-сигналу навігаційного об'єкта на тлі луна-сигналів атмосферного утворення з використанням енергетичної матриці розсіювання та пристрою обробки луна-сигналу складного об'єкта (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) на виході приймача суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу (СРПК). Теоретичною основою розпізнавання є радіофізична модель енергетичної матриці розсіювання з елементами, представленими параметрами Стокса та вимірюваними СРПК. Обрані

опромінювані луна-сигнали навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначили вигляд енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта та забезпечили функціонування СРПК в умовах складного атмосферного середовища під час розв'язування задачі поляризаційної селекції.

Розроблено схеми обробки луна-сигналу складного об'єкта, що дали змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна -сигналу складного об'єкта шляхом вимірювання елементів енергетичної матриці розсіювання.

Обґрунтовано можливість використання енергетичної матриці частково поляризованої хвилі під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища. Енергетична матриця розсіювання дає змогу одержати в СРПК інформацію про поляризацію луна-сигналу частково поляризованої хвилі навігаційного об'єкта й атмосферного утворення шляхом вимірювання інтенсивностей їхніх луна-сигналів, які й розв'язують завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів. Причому інтенсивність зливових випадних опадів вимірюється СРПК за першим параметром Стокса. Представлено результати експериментальної перевірки ефективності використання енергетичної матриці в поляризаційній селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечного для судноплавства атмосферного утворення.

Ключові слова: *радіолокаційне спостереження, навігаційний об'єкт, атмосферне середовище, частково поляризована хвиля, енергетична матриця розсіювання, радіолокаційна модель, складний об'єкт радіолокаційного спостереження, тезаурус, поляризаційна селекція.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. Застосування поляризаційних параметрів електромагнітних хвиль у суднових РЛС дасть змогу підвищити не тільки їхні потенційні та інформаційні можливості, а й розв'язати задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна. З урахуванням того, що луна-сигнал, який надходить на вхід антени суднової РЛС, є частково поляризованим при будь-якій поляризації випромінюваної хвилі, то виникає проблема виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта в частково поляризованій хвилі, яка до теперішнього часу остаточно не вирішена. Це пов'язано з можливістю ухвалення помилкового рішення під час оцінювання ефективності різних методів виявлення луна-сигналу навігаційного об'єкта за наявності луна-сигналу поляризованої, неполяризованої або частково поляризованої завади. До теперішнього часу в зарубіжних і вітчизняних публікаціях, авторами розглянуті різні методи і технічні засоби вдосконалення радіолокаційних методів з використанням поляризаційних властивостей електромагнітних хвиль, однак, поляризаційна селекція навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища, остаточно не представлена.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. Використовувані в суднових РЛС радіолокаційні методи, що ґрунтуються на вимірюванні амплітуд і фаз луна-сигналів складних об'єктів радіолокаційного спостереження, добре вивчені й дають змогу одержати уявлення про природу джерел випромінювання, про умови поширення електромагнітних хвиль та дають змогу дослідити механізм їхнього віддзеркалення й розсіювання [1]. У роботі [2] розглянуто новий метод моделювання когерентних морських перешкод. У роботі [3] представлено спільне оцінювання координатних і поляризаційних параметрів радіолокаційних об'єктів, однак, їх використання для підвищення розпізнавання об'єктів певного типу не представлено. У роботі [4] проведено аналіз алгоритмів некогерентного підсумовування та вибору максимуму за каналами, але були розглянуті тільки об'єкти з ідеально провідними поверхнями та чіткими геометричними формами під час їхнього радіолокаційного виявлення. У роботі [5] розглянуто варіанти функціональних схем радіолокаційних станцій з керованою поляризацією з урахуванням їхньої ефективності. Водночас, за основним напрямом удосконалення суднових РЛС, пов'язаним із поліпшенням розрізнення навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна, не здійснено повною мірою. Про те, що луна-сигнал від

метеоутворень являє собою стаціонарний, нормальний, випадковий процес, за якого середня потужність луна-сигналу не залежить від його потужності, показано в роботі [6]. Проаналізовано мережу МРЛ, що дає змогу синоптикам використовувати радіолокаційну інформацію про опади під час складання прогнозу погоди [7]. Однак, у наведених публікаціях не відображено важливу особливість інтерпретації первинних радіолокаційних даних щодо необхідності використання як інформативного параметра електромагнітної хвилі її поляризації. Відсутні публікації про застосування поляризаційних методів отримання інформації про навігаційні об'єкти в нових поповненнях суднових РЛС. Необхідність модернізації суднових РЛС представлена в розглянутих нижче публікаціях. Так у роботі [8] обґрунтовано необхідність використання надширококузових РЛС для морських суден. У роботі [9] розглянуто методи поляриметричної радіолокаційної візуалізації та оброблення, а в роботі [10] розглянуто радіолокаційну поляриметрію та інтерферометрію, поляризацію в дистанційному зондуванні, у роботі [11] представлено імітаційну модель блок-схеми РЛС із повним поляризаційним скануванням, а в роботі [12] дано спільне оцінювання координатних і поляризаційних параметрів радіолокаційних об'єктів. У роботі [13] розглянуто нові радіолокаційні методи і додатки, радар із решіткою з реальною апертурою, радар формування зображень, а також пасивний і мультистатичний радар. Представлено нові радіолокаційні методи і застосунки, різноманітність форм сигналів і когнетивний радар, а також стеження за цілями і об'єднання даних [14]. У роботі [15] представлено імпульсний доплерівський радар, принципи його побудови та застосування.

Однак аналіз наведених публікацій показав, що на практиці виконані теоретичні розробки поки що реалізувати не вдається. Виникає необхідність у переході до поляризаційних вимірювань луна-сигналів частково поляризованих хвиль складних об'єктів і розробленні суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів, які реалізують поляризаційні методи радіолокаційних спостережень, здатних не тільки визначати координати об'єкта, а й також здійснювати поляризаційну селекцію навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень.

Тому актуальним завданням є розроблення та практичне використання методу поляризаційної селекції, заснованого на енергетичній матриці та експериментальній перевірці його результатів на судовому радіолокаційному поляризаційному комплексі.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою цієї статті є розробка методології використання енергетичної матриці у розв'язанні задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

Виклад основного матеріалу дослідження. Просторово-часова фільтрація завад може здійснюватися радіолокаційними комплексами, що мають антени різного типу, зокрема й фазовані антенні решітки. На вхід приймача СРПК надходять луна-сигнали від атмосферних утворень (гідрометеорів), які маскують луна-сигнал спостережуваного навігаційного об'єкта. Гідрометеорні частинки є дипольними відбивачами для випромінювальної антени СРПК сантиметрового діапазону довжин хвиль (3-10 см) і мають довжину, яка дорівнює $\lambda/2$, із середньою ефективною поверхнею розсіювання $\bar{\sigma}_{ef}$ диполя, що дорівнює $0,17 \lambda^2$. При множенні $\bar{\sigma}_{ef}$ на кількість дипольних відбивачів n у радіолокаційному об'ємі атмосферного утворення, виходить значення сумарної ефективною поверхні розсіювання частинок атмосферного утворення (АУ), які одночасно розсіюють енергію опромінюваної хвилі, тобто

$$\sigma_{\Sigma efAV} = 0,17 \lambda^2 n . \quad (1)$$

Ефективність радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення, буде в тому разі, якщо сумарна ефективна поверхня розсіювання частинок атмосферного утворення буде меншою за ефективну поверхню навігаційного об'єкта (НО) на величину коефіцієнта пригнічення N , тобто

$$\sigma_{\Sigma efAV} \leq N \cdot \sigma_{efHO} , \quad (2)$$

де $N = \frac{\sigma_{efAV}}{\sigma_{efHO}}$ - коефіцієнт подавлення заважаючого фону атмосферного утворення.

Однак реальних $\sigma_{\Sigma efAV}$ і σ_{efHO} отримати важко, тому необхідний пошук інших напрямів, які дають змогу виділити об'єкт радіолокаційного спостереження з пасивних завад атмосферного утворення на траєкторії руху судна. Завади від гідрометеорів створюють на індикаторі СРПК зображення, ідентичні навігаційним об'єктам, які їх маскують і зменшують радіолокаційне спостереження.

Не дивлячись на те, що до теперішнього часу розроблено різні методи пристрою пригнічення завад, до яких належать фільтрові системи верхніх і нижніх частот, смугові фільтри, пристрої кутової селекції та бланкування, дискримінатори частоти повторення імпульсів, перебудови частоти за діапазоном, компенсатори перешкод за бічними пелюстками тощо, однак невизначеності, спричинені завадами, призводять до помилкових, щодо реальної ситуації, рішень. Різноманітні ситуації, наявні під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, змушують урахувати семантику та прагматику луна-сигналів атмосферних завад. Виникає необхідність використовувати тезаурус, який утворює відомості про атмосферні завади (інтенсивність випадних опадів). Характеристики луна-сигналів під час спостереження навігаційного об'єкта в атмосферних завадах базуються на часових, просторових і поляризаційних параметрах. Поляризаційні дійсні параметри дають змогу здійснювати розпізнавання об'єкта на тлі атмосферних завад із використанням наявного в архіві СРПК тезауруса шляхом порівняння луна-сигналів навігаційного об'єкта з луна-сигналами від опадів відомої інтенсивності. Імітаційною моделлю при цьому є енергетична матриця розсіювання з елементами, представленими дійсними енергетичними параметрами Стокса, які легко вимірюються СРПК. Поляризаційний напрям компенсації атмосферних завад під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів є альтернативним вирішенням наявної проблеми.

Отримання та використання енергетичної матриці розсіювання для пригнічення атмосферних завад під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів є актуальним завданням суднової радіолокації.

Дистанційне вимірювання усереднених за часом поляризаційних параметрів Стокса луна-сигналів S_1 , S_2 , S_3 , S_4 частково поляризованої хвилі під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення, проведено в лінійному (L) і круговому (KP) базисах. У разі використання лінійного базису взаємозв'язок параметрів Стокса з амплітудами ортогональних компонент електромагнітної хвилі E_{xm} , E_{ym} і різницею фаз Φ_{xy} між ними встановлюється за допомогою таких співвідношень:

$$\begin{aligned} S_1^L &= \langle E_{x\max}^2 \rangle + \langle E_{y\max}^2 \rangle, \\ S_2^L &= \langle E_{x\max}^2 \rangle - \langle E_{y\max}^2 \rangle, \\ S_3^L &= 2 \langle E_{x\max} \rangle \langle E_{y\max} \rangle \cos F_{xy}, \\ S_4^L &= 2 \langle E_{x\max} \rangle \langle E_{y\max} \rangle \sin F_{xy}. \end{aligned} \quad (3)$$

У разі використання кругового базису взаємозв'язок параметрів Стокса з амплітудами ортогональних компонент правого і лівого обертання електричного вектору хвилі E_{nm} , E_{lm} і різницею фаз між ними Φ_{nl} записується у вигляді:

$$\begin{aligned}
S_1^{KP} &= \langle E_{n\max}^2 \rangle + \langle E_{l\max}^2 \rangle, \\
S_2^{KP} &= \langle E_{n\max}^2 \rangle - \langle E_{l\max}^2 \rangle, \\
S_3^{KP} &= 2 \langle E_{n\max} \rangle \langle E_{l\max} \rangle \cos \Phi_{nl}, \\
S_4^{KP} &= 2 \langle E_{n\max} \rangle \langle E_{l\max} \rangle \sin \Phi_{nl}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Сукупність параметрів Стокса луна-сигналів електромагнітної хвилі навігаційного об'єкта, за яким спостерігає СРПК, у кожний момент часу, що розглядається, відображає його функціонування. Використання лінійного і кругового базисів розглядається з погляду цінності одержуваної інформації під час спостереження навігаційного об'єкта.

Уведемо вектор-параметр Стокса для квазімонохроматичної хвилі, випромінюваної антеною СРПК, у вигляді згрупованих параметрів Стокса в 4x4 вектор-стовпець:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Спостережуваний СРПК навігаційний об'єкт послідовно опромінюється електромагнітною хвилею чотирьох поляризацій, з яких три лінійні вертикальна (*ЛВ*), горизонтальна (*ЛГ*) і з нахилом електричного вектору під кутом 45° (*Л45°*) та одна кругова (*КР*). Вектор Стокса для кожної поляризації випромінюваної хвилі запишеться такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
S_{\text{вун}}^{LB} &= S_{1\text{вун}}, S_{2\text{вун}}, 0, 0; \\
S_{\text{вун}}^{LG} &= S_{1\text{вун}}, -S_{2\text{вун}}, 0, 0; \\
S_{\text{вун}}^{L45^\circ} &= S_{1\text{вун}}, 0, S_{3\text{вун}}, 0; \\
S_{\text{вун}}^{KP} &= S_{1\text{вун}}, 0, 0, S_{4\text{вун}}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Під час розсіювання опромінюваної хвилі будь-якої з наведених чотирьох поляризацій навігаційним об'єктом, атмосферним утворенням або навігаційним об'єктом і атмосферним утворенням, формується луна-сигнал певної поляризації, який містить інформацію про їхні відбивні властивості. Параметри Стокса опромінюваної хвилі під час відбиття зазнають перетворень, оскільки відбита електромагнітна хвиля в обох випадках має поляризаційну структуру, відмінну від поляризаційної структури опромінюваної хвилі. Змінюватимуться і коефіцієнти відбиття. З огляду на лінійність процесу розсіювання електромагнітної хвилі взаємозв'язок поляризаційних параметрів відбитої хвилі з коефіцієнтами відбиття, які є елементами енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта для кожної з наведених поляризацій опромінюваної хвилі в загальному вигляді визначається співвідношенням:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{від}}(t) \\ S_{2\text{від}}(t) \\ S_{3\text{від}}(t) \\ S_{4\text{від}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t) & \alpha_{12}(t) & \alpha_{13}(t) & \alpha_{14}(t) \\ \alpha_{21}(t) & \alpha_{22}(t) & \alpha_{23}(t) & \alpha_{24}(t) \\ \alpha_{31}(t) & \alpha_{32}(t) & \alpha_{33}(t) & \alpha_{34}(t) \\ \alpha_{41}(t) & \alpha_{42}(t) & \alpha_{43}(t) & \alpha_{44}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{1\text{вун}}(t) \\ S_{2\text{вун}}(t) \\ S_{3\text{вун}}(t) \\ S_{4\text{вун}}(t) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій дозволяє визначити всі елементи $\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$ матриці (7), що є дійсними енергетичними параметрами Стокса, які утворюють енергетичну матрицю розсіювання складного об'єкта (*CO*) та повністю характеризують його відбивні властивості, тобто

$$[S_{enCO}(t)] = \begin{bmatrix} \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) - S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{1ei0}^{J45^{\circ}}(t) - \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{1ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) - S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{2ei0}^{J45^{\circ}}(t) - \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{2ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) - S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{3ei0}^{J45^{\circ}}(t) - \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{3ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) - S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{4ei0}^{J45^{\circ}}(t) - \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{4ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Усі елементи, які входять в енергетичну матрицю розсіювання (8) складного об'єкта, легко вимірюються СРПК на шляху судна. Енергетична матриця розсіювання дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення. Розділення луна-сигналу навігаційного об'єкта та луна-сигналу атмосферного утворення здійснюється за відмінністю їхніх енергетичних матриць розсіювання, шляхом віднімання від енергетичної матриці складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення, яка для відомих типів небезпечних атмосферних утворень (зливові опади різної інтенсивності) міститься в архіві комп'ютера СРПК. Більшість реальних атмосферних середовищ мають електродинамічні параметри, які відповідають дійсній і симетричній енергетичній матриці розсіювання. Вимірювання параметрів Стокса проводять в одновимірних радіолокаційних каналах, коли відсутні фізичні та геометричні межі радіолокаційного об'єму атмосферного утворення. Обрані опромінювані та відбиті сигнали від навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначили вигляд енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, що дає змогу здійснити зв'язок параметрів Стокса складного об'єкта з радіолокаційними сигналами та зрештою забезпечити функціонування СРПК в умовах складного атмосферного середовища під час розв'язання задачі поляризаційної селекції.

Енергетична матриця атмосферного утворення пов'язана з уявленням про тезаурус, тобто накопичені відомості про структуру атмосферного утворення і процеси, що протікають у ньому. Радіолокаційне сукупне опрацювання вимірюваних дійсних параметрів Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта дає змогу застосувати його енергетичну матрицю розсіювання для виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта.

За допомогою пристроїв (рис.1 і рис.2) проводиться віднімання в автоматичному режимі з енергетичної матриці луна-сигналу складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення, відповідної до тих, які випадають у момент радіолокаційного спостереження складного об'єкта, дощовим опадам вимірюваної інтенсивності. Отримана в результаті віднімання енергетична матриця навігаційного об'єкта надходить на індикатор СРПК і дисплей комп'ютера для дистанційного спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення на траєкторії руху судна.

Отримана енергетична матриця розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта відповідає його поданню сукупністю "блискучих точок", певному вибору виду поляризацій електромагнітної хвилі, що опромінює навігаційний об'єкт, та прийнятим луна-сигналам вертикальної та горизонтальної поляризаціям.

Перевага розглянутої методики радіолокаційної поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення, проявляється в накопиченні метеорологічної інформації про відбивні властивості наявних небезпечних атмосферних утворень, введених у банк даних СРПК.

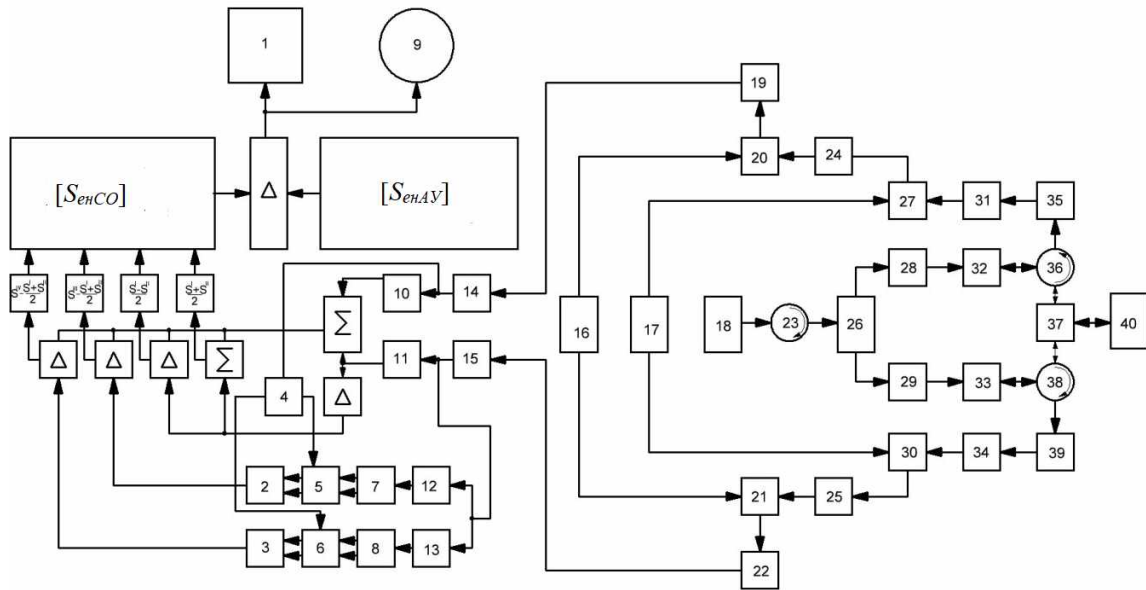


Рисунок 1 - Функціональна схема пристрою СРПК, що синтезує алгоритм розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення:

$[S_{enCO}]$ - енергетична матриця розсіювання складного об'єкта; $[S_{enHO}]$ - енергетична матриця розсіювання навігаційного об'єкта; $[S_{enAV}]$ - енергетична матриця розсіювання атмосферного утворення; Δ - віднімачі; Σ - суматори;

1 - дисплей комп'ютера СРПК; 2,3 - підсилювачі постійного струму; 4,12,13 - підсилювачі фазообертачі; 5,6 - каскади перемноження; 7,8 - парафазні підсилювачі; 9 - індикатор СРПК; 10,11 - квадратичні детектори; 14,15,19,22 - лінійні підсилювачі проміжної частоти 4 МГц; 6,17 - гетеродини для проміжної частоти 4 МГц і 30 МГц; 18 - передавач СРПК; 20,21 - балансні змішувачі проміжної частоти 4 МГц; 23 - циркулятор; 24,25 - підсилювачі проміжної частоти 30 МГц; 26 - роздільник потужності; 27,30 - балансні змішувачі проміжної частоти 30 МГц; 28,29 - фазообертачі; 31,34 - підсилювачі сигналу високої частоти; 32,33 - атенюатори; 35,39 - розрядники захисту приймачів; 36,38 - антенні перемикачі; 37 - поляризаційний селектор; 40 - випромінювач.

Параметри Стокса луна-сигналу CO при його опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій:

$$S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4 (S_{1\text{в}id}^{LB}, S_{1\text{в}id}^{ЛГ}, S_{1\text{в}id}^{Л45^\circ}, S_{1\text{в}id}^{KP}) - \text{перший параметр};$$

$$S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4 (S_{2\text{в}id}^{LB}, S_{2\text{в}id}^{ЛГ}, S_{2\text{в}id}^{Л45^\circ}, S_{2\text{в}id}^{KP}) - \text{другий параметр};$$

$$S_3^1, S_3^2, S_3^3, S_3^4 (S_{3\text{в}id}^{LB}, S_{3\text{в}id}^{ЛГ}, S_{3\text{в}id}^{Л45^\circ}, S_{3\text{в}id}^{KP}) - \text{третій параметр};$$

$$S_4^1, S_4^2, S_4^3, S_4^4 (S_{4\text{в}id}^{LB}, S_{4\text{в}id}^{ЛГ}, S_{4\text{в}id}^{Л45^\circ}, S_{4\text{в}id}^{KP}) - \text{четвертий параметр}.$$

Завдання СРПК полягає у вимірюванні дійсних параметрів Стокса луна-сигналів від складного об'єкта на шляху судна, за якими визначається інтенсивність процесу в атмосферному утворенні (інтенсивність дощу або снігопаду), і на основі наявного тезаурусу здійснюється порівняння виміряної інтенсивності небезпечного атмосферного утворення з наявними в банку даних. Для виміряної інтенсивності, в автоматичному режимі, в банку даних СРПК знаходиться енергетична матриця розсіювання спостережуваного небезпечного атмосферного утворення.

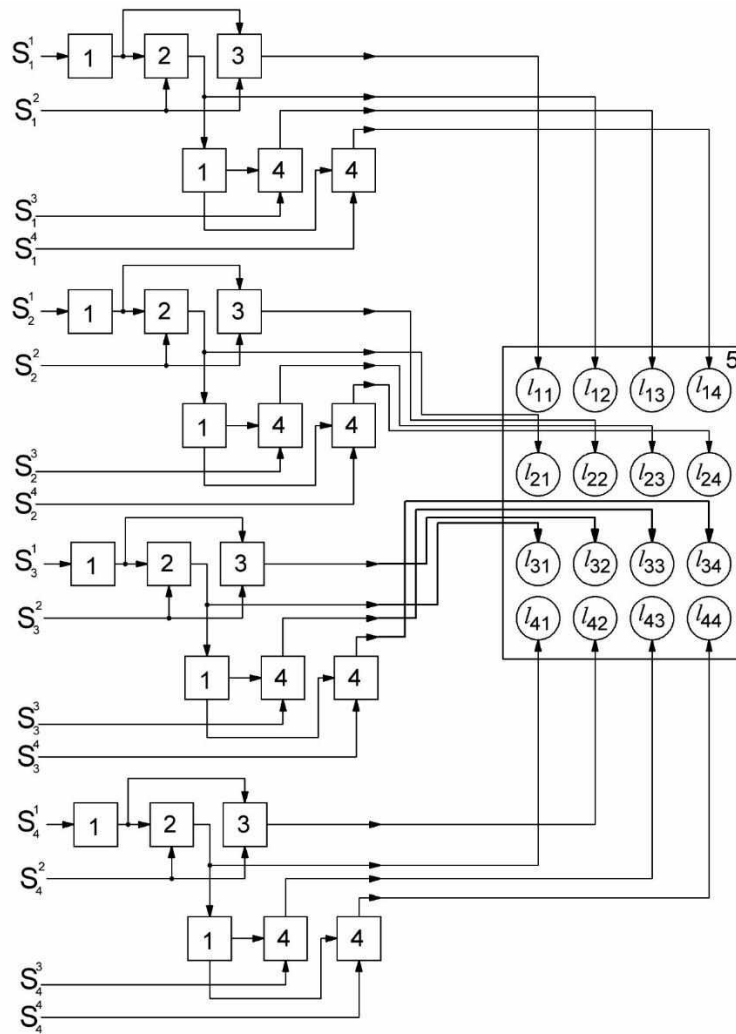


Рисунок 2 - Функціональна схема пристрою отримання енергетичної матриці розсіювання луна-сигналу складного об'єкта (СО):

$l_{11} - l_{44}$ – елементи енергетичної матриці розсіювання СО;

1 – ультрозвукові лінії затримки RLT – D6386;

2, 3, 4 – підсумовуючий і віднімаючий блоки;

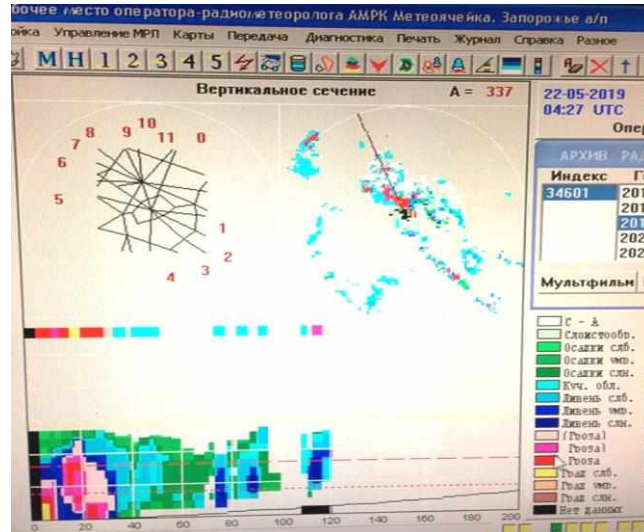
5 – енергетичні матриці розсіювання луна-сигналу складного об'єкта.

З енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, отриманої пристроєм її формування СРПК (рис.1 і рис.2) віднімається енергетична матриця розсіювання небезпечного атмосферного утворення. У результаті віднімання від енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення отримується енергетична матриця розсіювання навігаційного об'єкта, що надходить на індикатор СРПК та дисплей його комп'ютера для дистанційного радіолокаційного спостереження. З урахуванням виділення луна-сигналу атмосферного утворення з луна-сигналу складного об'єкта з використанням їхніх енергетичних матриць розсіювання та отримання енергетичної матриці розсіювання навігаційного об'єкта, сформований тезаурус атмосферних утворень певних інтенсивностей дає змогу СРПК ефективно використовувати накопичену інформацію про атмосферне утворення та повною мірою враховувати фактори атмосферного середовища під час проведення радіолокаційного розпізнавання об'єктів дистанційного спостереження.

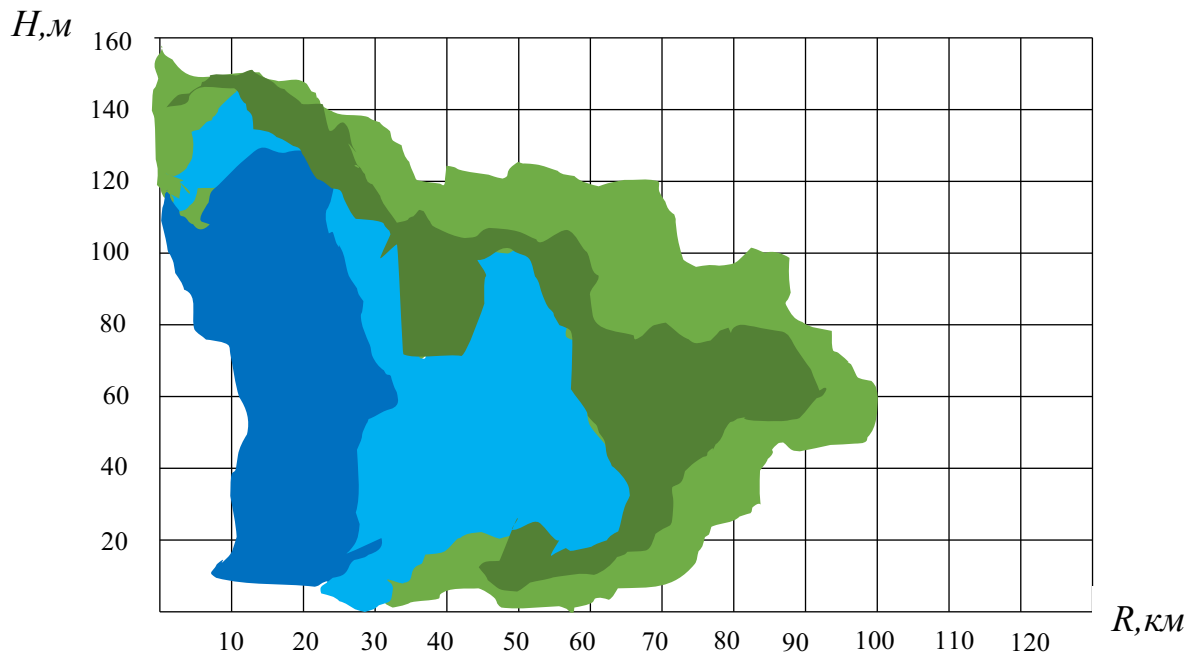
Експериментальні дослідження були проведені в прибережній зоні Азовського моря Запорізької області на СРПК спільно з мережевим радіолокаційним комплексом АМРК, до складу якого входить двоххвильовий ($\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см) відкалібрований метеорологічний

радіолокатор п'ятого покоління МРЛ-5 та автоматизована система обробки луна-сигналів метеоб'єктів "МЕТЕОКОМПКА" в період з червня до вересня 2019 року і в травні - липні 2020 року. Подання метеоданих на екрані ЕОМ АМРК здійснювалося у вигляді кольорових карт метеоявищ у дальній і ближній зонах.

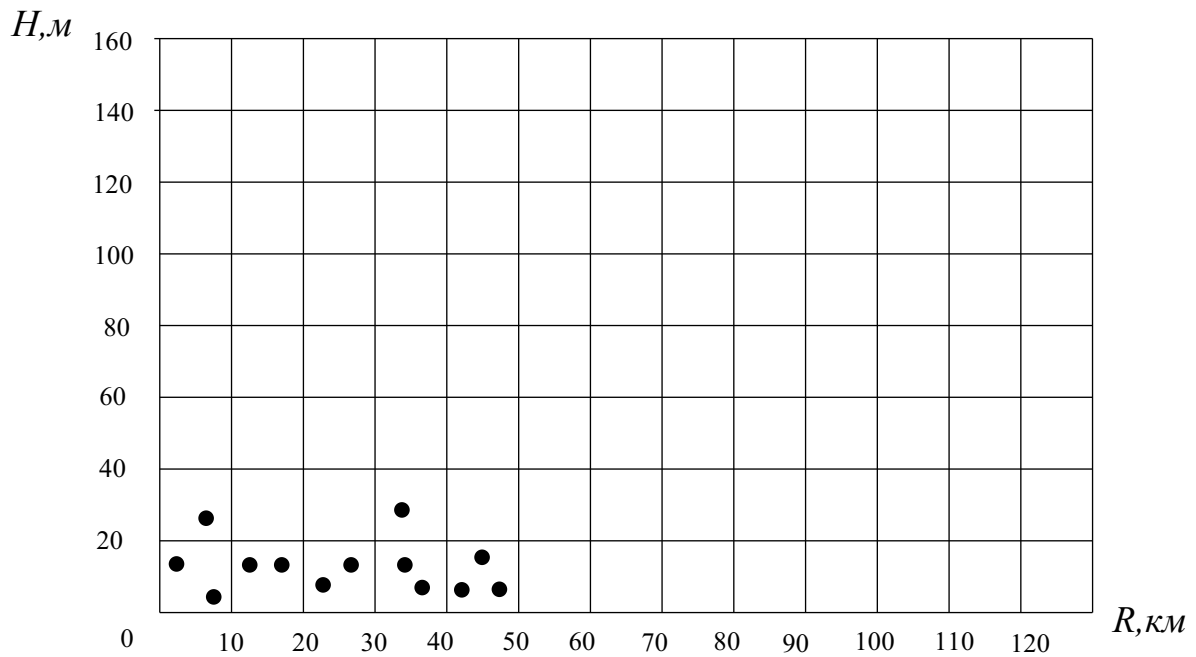
Результати експериментальних досліджень з радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, виконаних СРПК з використанням енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів складного об'єкта при поляризаційній селекції і оптимального алгоритму, надані на рис.3а,б,в з азимутом радіолокаційного спостереження $A_1 = 337^\circ$, а також для азимута $A_2 = 344^\circ$ на рис.4 а,б,в.



а)



б)



в)

Рисунок 3 - Результати експериментального радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів різної інтенсивності у напрямі азимута $A_1 = 337^\circ$ представлені: а - на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА»; б - на дисплеї СРПК;

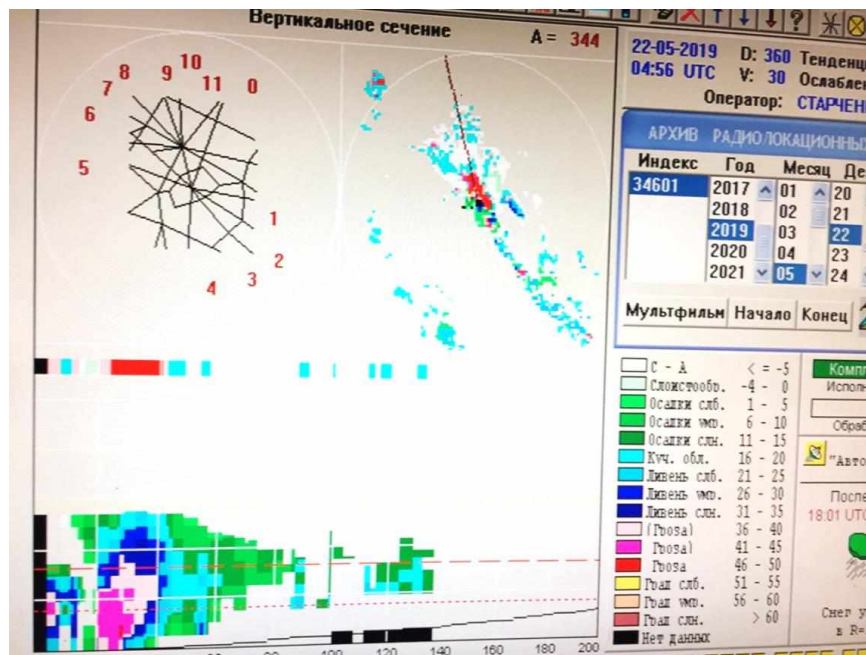
в - представлені на дисплеї СРПК при поляризаційній селекції з використанням енергетичної матриці розсіювання

Оптимальний алгоритм для реалізації радіолокаційного методу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта з використанням *енергетичної матриці розсіювання* складного об'єкта встановлює:

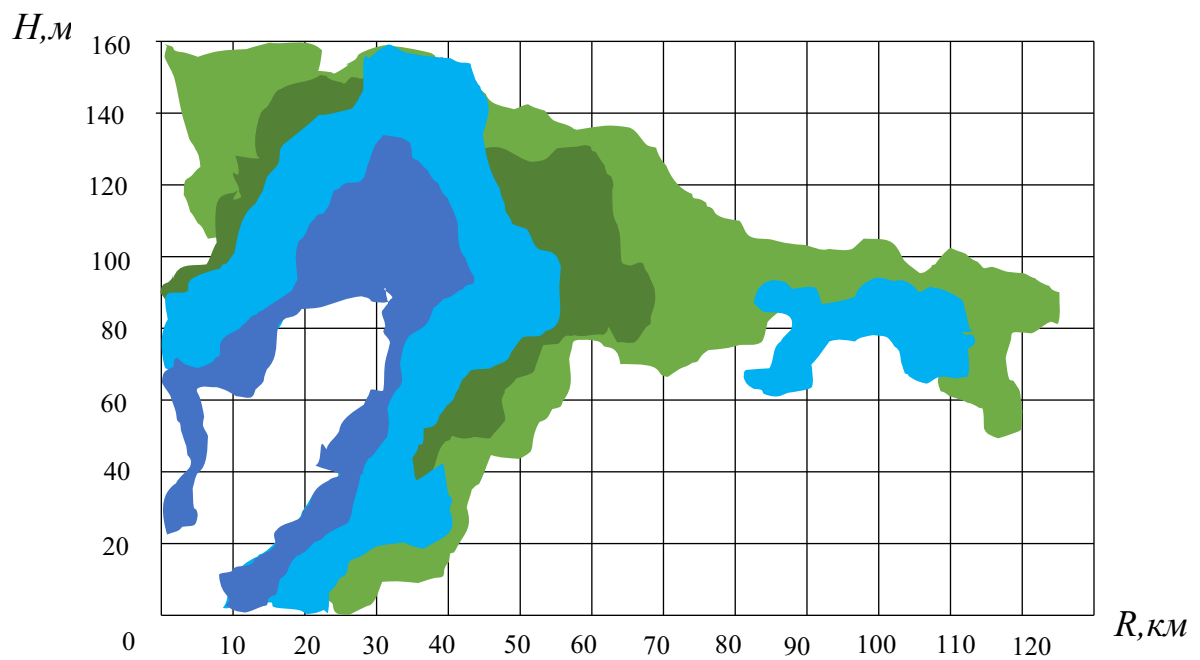
- послідовне опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями: трьома лінійними поляризаціями ЛВ, ЛГ, Л45° та однією КР;
- приймання всеполяризованою антеною СРПК луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта з подальшим вимірюванням параметрів Стокса для кожної поляризації випромінюваної хвилі;
- за виміряними параметрами Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта утворити його енергетичну матрицю розсіювання, що складається з 16 елементів;
- для даної максимальної інтенсивності випадних опадів, виконати віднімання енергетичної матриці випадних опадів даної інтенсивності (взятої в архіві комп'ютера СРПК), з енергетичної матриці складного об'єкта;
- у результаті віднімання двох матриць отримати енергетичну матрицю навігаційного об'єкта;
- за енергетичним слідом енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта (сума діагональних елементів матриці) провести радіолокаційне спостереження на дисплеї СРПК навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні випадних опадів.

Виконане експериментальне дослідження для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні випадних опадів з використанням *енергетичної матриці розсіювання* складного об'єкта показало високу ефективність радіолокаційного виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта та підтвердило

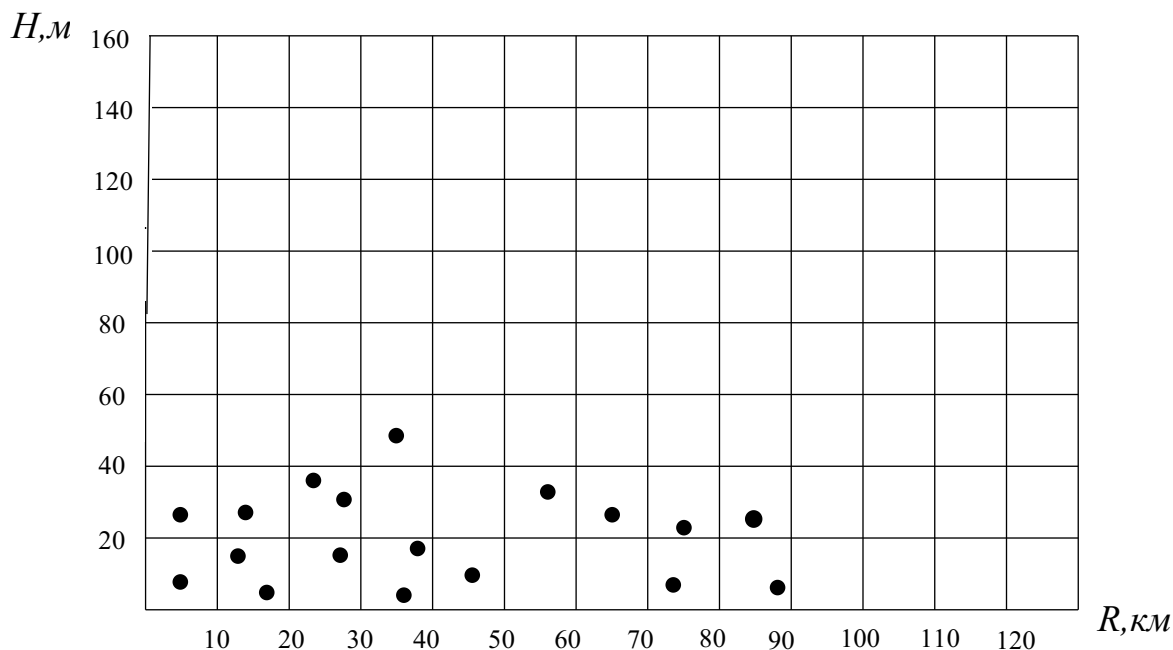
можливість використання в СРПК розробленого методу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна



а)



б)



в)

Рисунок 4 - Результати експериментального радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів різної інтенсивності у напрямі азимута $A_1 = 344^\circ$ представлені: а - на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМПРКА»; б - на дисплеї СРПК; в - представлені на дисплеї СРПК при поляризаційній селекції з використанням енергетичної матриці розсіювання

Висновки.

1. Представлено методологію використання енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в складних умовах атмосферного середовища, за траєкторією руху судна.
2. Експериментально підтверджено виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів із луна-сигналів складного об'єкта та їх радіолокаційне спостереження на дисплеї комп'ютера СРПК.
3. Показано, що використання поляризаційної селекції в СРПК дає змогу здійснювати радіолокаційне спостереження по трасі руху судна тільки луна-сигналу навігаційного об'єкта, що забезпечує підвищення безпеки судноводіння.
4. Поляризаційними характеристиками для оцінки луна-сигналу навігаційного об'єкта є дійсні енергетичні параметри Стокса, які входять до енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта.
5. Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, базується на радіолокаційній моделі відбиваючих властивостей складного об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко В.Ф. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко. – М.: Физматлит, 2015. – 448с.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320с.
3. Бакулев П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, Б. М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288с.

4. Мусорин О.О. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації суден у сучасних умовах / О.О. Мусорин, Ю.С. Шапран, І.В. Трофименко // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку, 2017. - №1(45) – с. 117-121.
5. Старых А.В. Варианты функциональных схем радиолокационных станций с управляемой поляризацией / А.В. Старых, Г.Н. Жилинская // Научный вестник МГТУ ГА. - № 186, 2012. – с. 145-148.
6. Beyer S., Fleuth IL, Mahner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). - COST 75, 1999, pp. 221-228.
7. Cavaili R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. COST 75, 1999, pp. 159-164.
8. Koshevoi V.M. Utilization of ultra-wideband equipment for marine radar tasks / V.M. Koshevoi, A.A. Shevchenko // Shipbuilding: Collection of scientific works / NU "OMA". - Issue 28. - Odesa: VydavInform, 2018, pp. 78-87.
9. Lee J. S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009.
10. Cloude S. Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press, 2009.
11. Akinshin N.S. Model of matrix mutual correlation function of sounding and reflected vector signals for the conceptual design of airborne synthetic aperture radar / N.S. Akinshin, O.V. Esikov, D.A. Zatuchny, A.V. Peteshov // Scientific Bulletin of MSTU GA. - Vol.22. - No. 02, 2019. – pp.86-95.
12. Akinshin N.S., Varenitsa Yu.I. and Khomyakov K.A. (2016) Sovmestnaya otsenka koordinatnykh i polyarizatsionnykh parametrov radiolokatsionnykh obektov [Joint estimation of coordinate and polarization parameters of radar objects]. Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki [The News of The Tula State University, ser. Technical Sciences], vol. 2, pp. 3–14.
13. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths, Wolfgang Koch. Novel Radar Techniques and Applications. Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar. Institution of Engineering & Technology, 2017. – 951 p. ISBN: 9781613532256
14. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths, Wolfgang Koch. Novel Radar Techniques and Applications. Volume 2: Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion. SciTech Publishing, 2017. – 553 p. ISBN: 9781613532263
15. Clive Alabaster. Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications. SciTech Publishing Inc, United States, 2012. – 420 p. ISBN: 9781891121982

REFERENCES

1. Kravchenko V.F. Scattering of radio waves by the sea and detection of objects on its background / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko. - Moscow: Fizmatlit, 2015. – 448p.
2. Bakulev, P.A. Radar systems / P.A. Bakulev. - Moscow: Radiotekhnika, 2004. – 320p.
3. Bakulev, P.A. Methods and devices of moving target selection / P.A. Bakulev, B.M. Stepin. - Moscow: Radio and Communication, 1986. – 288p.
4. Musorin, O.O. Peculiarities of analitical support of ship operation under current conditions / O.O. Musorin, Y.S., Shapran I.V. Trofimenko // Scientific notes of the Ukrainian scientific and research Institute of telecommunications, 2017. - №1(45). - pp.117-121.
5. Starykh, A.V. Variants of functional schemes of radar stations with controlled polarisation / A.V. Starykh, G.N. Zhilinskaya // Scientific Bulletin of MSTU GA. - № 186, 2012. - pp.145-148.
6. Beyer S., Fleuth IL, Mahner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). - COST 75, 1999, pp. 221-228.
7. Cavaili R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. COST 75, 1999, pp. 159-164.
8. Koshevoi V.M. Utilization of ultra-wideband equipment for marine radar tasks / V.M. Koshevoi, A.A. Shevchenko // Shipbuilding: Collection of scientific works / NU "OMA". Issue 28. - Odesa: VydavInform, 2018. - pp.78-87.

9. Lee J. S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009.
10. Cloude S. Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press, 2009.
11. Akinshin N.S. Model of matrix mutual correlation function of sounding and reflected vector signals for the conceptual design of airborne synthetic aperture radar / N.S. Akinshin, O.V. Esikov, D.A. Zatuchny, A.V. Peteshov // Scientific Bulletin of MSTU GA. - Vol.22. No. 02, 2019. – pp.86-95.
12. Akinshin, N.S., Varenitsa, Yu.I. and Khomyakov, K.A. (2016) Sovmestnaya otsenka koordinatnykh i polarizatsionnykh parametrov radiolokatsionnykh obektov [Joint estimation of coordinate and polarization parameters of radar objects]. Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki [The News of The Tula State University, ser. Technical Sciences], vol. 2, pp. 3–14.
13. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths, Wolfgang Koch. Novel Radar Techniques and Applications. Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar. Institution of Engineering & Technology, 2017. – 951p. ISBN: 9781613532256
14. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths, Wolfgang Koch. Novel Radar Techniques and Applications. Volume 2: Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion. SciTech Publishing, 2017. - 553p. ISBN: 9781613532263
15. Clive Alabaster. Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications. SciTech Publishing Inc, United States, 2012, - 420p. ISBN: 9781891121982

Korban D.V., Burmaka I.A.

RADAR OBSERVATION OF NAVIGATION OBJECTS IN COMPLEX ATMOSPHERIC CONDITIONS USING POLARISATION SELECTION OF ECHO - SIGNALS

The paper theoretically substantiates and experimentally confirms the methodology of using polarization selection of navigation objects located on the ship's trajectory in complex conditions of atmospheric environment by ship radar polarization complex. It is shown that the use of real Stokes energy parameters allows to recognize the echo-signal of a navigation object against the background of echo-signals of atmospheric formation with the use of energy scattering matrix and echo-signal processing device of a complex object (navigation object and atmospheric formation) at the output of the receiver of the ship radar polarization complex (SRPC). The theoretical basis for recognition is a radiophysical model of the scattering energy matrix with elements represented by Stokes parameters and measured SRPC. The selected irradiating echo-signals of the navigation object and atmospheric formation determined the type of energy scattering matrix of a complex object and ensured the functioning of SRPC in a complex atmospheric environment when solving the problem of polarization selection.

The schemes for processing the echo-signal of a complex object have been developed, which made it possible to separate the echo-signal of a navigation object from the echo-signal of a complex object by measuring the elements of the energy matrix of scattering.

The possibility of using the energy matrix of partially polarized wave in polarization selection of navigation objects located in complex conditions of atmospheric environment was substantiated. The energy matrix of scattering allows to obtain in SRPC the information about polarization of echo-signal of partially polarized wave of navigation object and atmospheric formation by measuring the intensities of their echo-signals, which solve the problem of polarization selection of navigation objects. Moreover, the intensity of rainfall is measured by the SRPC according to the first Stokes parameter. The results of experimental verification of the efficiency of using the energy matrix in polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formation dangerous for navigation are presented.

Keywords: radar observation, navigation object, atmospheric medium, partially polarized wave, scattering energy matrix, radar model, complex radar object, thesaurus, polarization selection.

Тимочко О.І., Тимощук О.М., Руденко В.М., Сітков О.М.

СИТУАЦІЙНА ОБІЗНАНІСТЬ ОПЕРАТОРІВ БЕРЕГОВИХ ЦЕНТРІВ УПРАВЛІННЯ ЯК ОСНОВНА ПЕРЕДУМОВА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ БЕЗПІЛОТНИХ СУДЕН

Метою роботи є дослідження ситуаційної обізнаності операторів берегових центрів управління для безпечної експлуатації безекіпажних автономних суден. Поставлена мета досягається шляхом аналізу основних рішень, спрямованих на розширення зони безпілотного режиму плавання автономних безекіпажних суден. Детальний аналіз проекту MUNIN щодо здійснення автономного безпілотного трансокеанського рейсу на великому суховантажному судні показав, що лише на трансокеанському відрізку реалізовано автономне безпілотне управління. Досліджено схему організації управління безекіпажним судном та особливості керування ним у районах входу (виходу) у (з) порт(у). Підкреслено провідну роль інформаційно-телекомунікаційних технологій для передачі інформації на борту суден, між суднами і між суднами і береговими службами. Запропоновані раціональні швидкості руху безекіпажних суден для зменшення викиду відпрацьованих газів. Виявлені особливості і здійснено порівняння властивостей безпілотного й автономного судна. Підкреслено провідну роль людського фактору у системі «безекіпажне судно-оператор-наколишнє середовище», що впливає на досягнення головної мети місії судна. Доведено необхідність підтримання високого рівня ситуаційної обізнаності при перенесенні людського фактору з судна на берег в динамічних безекіпажних системах й більш глибокого врахування людського фактору. Виявлено, що обсяг і період оновлення інформації, що надходить, до берегового центру управління є одним з ключових у плані ситуаційної обізнаності оператора, який керує безпілотним судном. Запропоновано принципи групування інформації, що надходить на судно і забезпечує обізнаність віддаленого оператора про ситуацію. Найбільш суттєвим результатом дослідження є критичний аналіз предметної області та доведення важливої ролі людини у безпечній експлуатації безпілотних суден, можливі помилки, що може припустити оператор, і шляхи їх подолання. Подальшим напрямом роботи є проведення досліджень щодо встановлення особливостей управління безекіпажним судном при застосуванні е-навігації.

Ключові слова: автономне судно, безпілотне судно, е-навігація, ситуаційна обізнаність, оператор, інформація, управління.

Постановка проблеми. Останні роки характеризуються активним впровадженням безпілотних систем у різних сферах діяльності людини. Зрозуміло, що провідну роль такі апарати і системи грають у військовій області. Причому вони застосовуються не тільки у повітрі, про що ми чуємо найчастіше, але й на землі, на воді, під водою, та у космічному просторі. Все ширше безпілотні системи знаходять застосування у різних цивільних областях.

Так, ЄС з 2012 року активно працює над проектом MUNIN (Maritime Unmanned Ship through Intelligence in Networks – навігація морського безпілотного судна за допомогою розвідки в мережах). MUNIN досліджує можливість створення і подальшої експлуатації безпілотних (безекіпажних) автономних торговельних суден. На першому етапі особливістю таких суден досліджувався безпілотний режим роботи тільки під час океанських переходів. А на самих відповідальних ділянках маршруту – виходу з порту і входу до нього – однозначно передбачалася наявність пілота. в порт. Подальші дослідження спрямовані на розширення зони безпілотного режиму.

Безпілотний режим роботи судна забезпечуватиметься безперебійним функціонуванням автоматичної системи на основі інформації від бортових датчиків. Така побудова контуру

управління дозволяє судну автономно виконувати стандартні маневри для уникнення зіткнення відповідно до міжнародних правил (COLREGS, МПЗЗС-72). З метою підвищення безпеки судноплавства безекіпажне судно постійно контролюється віддаленим береговим центром. При виникненні збоїв у програмній або апаратній частині автоматичної системи береговий центр бере на себе дистанційне керування. Основними обов'язками операторів берегового центру управління при дистанційному керуванні є підтримання максимальної ситуаційної обізнаності і вирішення стандартних проблем з автоматикою безекіпажного судна. Така постановка завдання управління та запропонований порядок її вирішення має підтвердити однакову безпечність безпілотних і пілотованих судових систем.

Дослідницький проект MUNIN задумувався з метою здійснення автономного безпілотного трансокеанського рейсу на 200-метровому суховантажному судні від виходу з порту-відправника до входу до порту прибуття. Фактично автономне безпілотне управління планувалося виконувати лише на основній ділянці плавання – на трансокеанському відрізку: від місця висадки пілота у порту-відправнику до місця посадки пілота у порту прибуття. Для реалізації такого безпілотного трансокеанського рейсу звичайне суховантажне судно дооснащується відповідними технологіями управління. Особливості реалізації проекту MUNIN зображені на рис. 1.

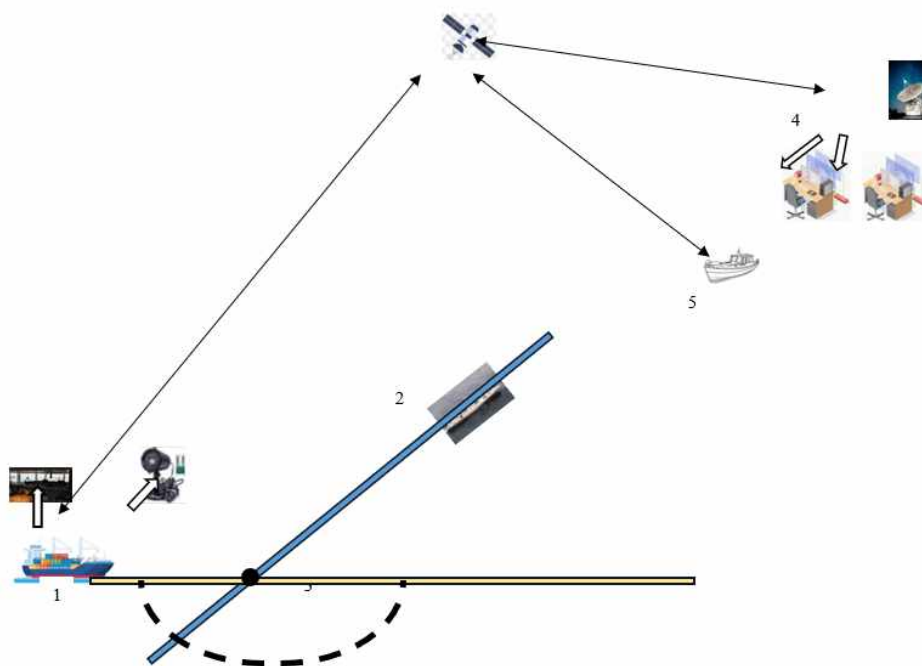


Рисунок 1 – Порядок функціонування проекту MUNIN

Безпілотне судно (1), оснащене автономним судовим контролером, системою двигунів, відеосистемою з інфрачервоним і гіроскопічним стабілізатором денного світла, рухається за визначеним маршрутом. Датчики, що знаходяться на борту судна, виявили на маршруті руху перешкоду у вигляді судна (2). Передана від датчиків й оброблена автономним судовим контролером інформація дозволила йому зробити висновок, що у точці (3) можливе зіткнення суден (1) і (2). Тому судно (1) готується виконати маневр ухилення. За судном дистанційно спостерігають оператори берегового центру управління (БЦУ) (4), які у разі виникнення надзвичайної ситуації у будь-який час можуть взяти на себе дистанційне керування судном. Крім того, дистанційно керувати судном може лоцманський катер (5), що наближається, з лоцманом і командою на борту.

Таким чином, безекіпажні судна очікують на стрімкий розвиток, і необхідно дослідити причини, які будуть надавати найсерйозніший вплив на особливості їх експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки характеризуються глибокими дослідженнями у сфері розвитку дистанційно керованих, автоматизованих і автономних суден і їх безпечної експлуатації.

Численні роботи були спрямовані на розвиток електронної навігації [1], яка визначена як "гармонізований збір, інтеграцію, обмін і представлення морської інформації на борту і на березі за допомогою електронних засобів з метою поліпшення навігації від причалу до причалу і пов'язаних з нею послуг, безпеки на морі і захисту морського середовища" [2]. Спочатку електронна навігація була запропонована як рішення для навігації у відкритому морі. Однак у роботі [3] визначено, що послуги е-навігації необхідні також і для внутрішнього судноплавства, а довгострокова еволюція і система автоматичної ідентифікації (AIC) є ключовими факторами, що сприяють впровадженню послуг електронної навігації.

У роботі [4] зроблено висновок, що інформаційно-телекомунікаційні технології, впроваджені на сучасних суднах, не є достатніми для автономних повністю електричних пасажирських поромів для міського водного транспорту. Відповідно, в цій роботі пропонується спеціальна архітектура зв'язку, яка має на меті задовольнити потреби різних зацікавлених сторін.

У роботах [5, 6] автори дослідили використання мов моделювання та проектування на основі сценаріїв для опису функціональності автономних суден, довівши, що розглянуті методи підходять для управління складністю системи та передачі системної інформації.

З 2006 року ІМО визначила три основні цілі електронної навігації, а саме: розвиток і забезпечення інфраструктури для передачі інформації на борту суден, між суднами і між суднами і береговими зацікавленими сторонами [1].

Автори у роботі [7] запропонували чотири режими роботи автономних торговельних суден, а саме: а) автономне виконання, б) автономне управління, в) дистанційне управління та г) відмова від безпеки. Доведено, що е-навігація необхідна у всіх режимах роботи, і тому буде підтримуватися запропонованою архітектурою зв'язку. Безперервна передача телеметрії в реальному часі до центру дистанційного керування (ЦДК) необхідна для дистанційного моніторингу під час автономного виконання. У разі незначних змін, таких як зміна маршруту або швидкості для динамічного позиціонування відносно рухомих об'єктів, автономне судно переходить в режим автономного керування, в якому він продовжує працювати автономно, але передає додаткові дані про ситуацію у ЦДК і може очікувати на отримання незначних команд керування. У разі невирішених небезпечних ситуацій судно повинне передавати дані до ЦДК для покращеної та повної ситуаційної обізнаності, а також отримувати команди управління в реальному часі. Нарешті, у разі втрати зв'язку з ЦДК очікується, що автономне судно ініціює відповідну процедуру відмови в безпеці, буде викликана найближча аварійна група, яка наблизиться до судна і візьме на себе контроль над ситуацією, що склалася. Доведено, що ці режими роботи можуть бути досягнуті лише за допомогою послуг е-навігації, заснованих на надійному зв'язку, з низькою затримкою і достатньою пропускну здатністю для обробки обсягу даних, що генеруються і передаються датчиками. У цьому напрямку в літературі запропоновано багато комунікаційних архітектур для морських операцій, включаючи автономні морські судна.

Еталонна архітектура для торговельних суден без екіпажу була запропонована у [7], яка базувалася на чітких припущеннях, пов'язаних із забезпеченням основного, резервного і виділеного каналу зв'язку з ЦДК і дозволила реалізувати автономний судновий контролер, який виконує автономні і дистанційно керовані операції, на додаток до контролю відображення між доступними комунікаційними ресурсами і режимом управління судном.

У статті [8] автори провели огляд зв'язку і мереж для автономних морських суден і підкреслили, що технології мобільного зв'язку і WiFi широко застосовуються в додатках, що вимагають великої пропускну здатності і низької затримки.

У роботі [9] надається варіант вирішення проблеми навігації в портових зонах, схильних до аварій через підвищений трафік і обмежений простір для маневру, що викликає необхідність точного виконання маневрів, щоб уникнути пошкодження причалу.

Інша комунікаційна архітектура, що використовує технологію LTE для морського зв'язку, була запропонована у роботі [10]. Автори стверджували, що LTE можна надійно використовувати для збільшення дальності зв'язку "судно-берег" до 100 км.

Таким чином, невирішеними досі залишаються питання досягнення необхідної ситуаційної обізнаності операторів на берегових центрах при управлінні безекіпажними автономними суднами.

Метою роботи є дослідження ситуаційної обізнаності операторів берегових центрів управління для безпечної експлуатації безекіпажних автономних суден.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проведений поглиблений аналіз перспектив розвитку морської галузі, морських вантажних та пасажирських перевезень, екологічних проблем суспільства дозволив сформулювати основні причини доцільності застосування безпілотних суден: непривабливе людське робоче середовище на борту і ризик майбутньої нестачі моряків; прагнення знизити витрати на транспортування; глобальна потреба в скороченні викидів і прагнення підвищити безпеку судноплавства.

На думку багатьох фахівців, у найближчі 5-15 років більшість судноплавних компаній зіштовхнуться з низкою загроз для їхнього ефективного функціонування. Основною загрозою вважається "непривабливість галузі", що зіткнеться з жорстким ринком праці, з періодичною нестачею офіцерів, особливо в міру відновлення судноплавних ринків. Тому безпілотні судна (або малопілотовані судна з підтримкою автономними технологіями) можуть частково вирішити проблему нестачі професійно підготовлених кадрів для морської галузі.

У відповідь на постійне зниження витрат у судноплавній галузі за рахунок комплексної автоматизації різноманітних процесів, скорочення чисельності судових екіпажів і, відповідно, відносно зниження рівня безпеки і створення менш привабливих умов праці для членів екіпажів реалізація безпілотної судової системи може показати економічну ефективність проекту.

Для зменшення впливу судноплавної галузі на навколишнє середовище є застосування повільнішої швидкості суден. У роботі [11] доведено, що зниження швидкості типового контейнеровоза на 30% дозволяє на 50% скоротити споживання палива, а отже, і скоротити викиди. З іншого боку, для підтримання необхідного рівня перевезень при повільніших суднах вимагатиме більшої кількості суден, які також потребуватимуть палива. Отже, первісне рівняння перетворюється на більш складне і ні таке однозначне. Проведені розрахунки для контейнерних перевезень показали [11], що повільне пароплавство за умови збільшення кількості суден дозволяє скоротити викиди вихлопних газів приблизно на 11%. Таким чином, повільніші безпілотні судна означають довші рейси без збільшення витрат на заробітну плату судовому екіпажу і не принесуть соціально менш привабливих тривалих умов перебування моряків на борту судна.

Чисельні дослідження [1], [2], [3] показали, що людська помилка є причиною 65-96% всіх аварій на морі. Застосування безпілотної системи, тобто усунування людини від безпосереднього управління судном, повністю виключає людську помилку [4]. Однак, все не так просто, тому що програми для безекіпажних суден пишуть люди, і там можливі помилки програмування [5]. Крім того, оператори будуть залучені до моніторингу, дистанційного керування та технічного обслуговування суден. Ще однією проблемою слід вважати необхідність виконувати завдання безпілотним суднам не тільки разом з аналогічними апаратами, але й у кооперації з пілотованими суднами. Отже, можливість перенесення прийняття рішення від судоводія на борту судна, який піддається жорсткому впливу стресу і втомі, до людей, що програмують і проводять технічне обслуговування і менш схильні до негативних впливів, може позитивно сказатися на безпеці судноплавства. Тобто необхідно довести, що безпілотне судно, як мінімум, є такою ж безпечною, як і пілотоване.

Порівняння властивостей безпілотного й автономного судна.

Автономне судно контролюється автоматичними, заздалегідь запрограмованими, системами для навігації та управління двигунами. Але автономна система також володіє певним рівнем штучного інтелекту (ШІ), який дозволяє виявляти та ідентифікувати інші судна і здійснювати маневри для уникнення зіткнення відповідно до Міжнародних правил запобігання

зіткненням суден у морі (COLREGS). Однак, згідно з введеними на початку обмеженнями, автономне судно не обов'язково буде безпілотним. По-перше, на судні протягом частини рейсу можуть перебувати бригади технічного обслуговування для обслуговування або ремонту систем на борту. По-друге, судно буде пілотованим під час заходу в порт і виходу з нього.

Згідно з визначенням, безпілотним судном називається судно без людей на борту. Насамперед, судна будуть безпілотними під час трансокеанського етапу подорожі. Однак безпілотне судно не обов'язково є автономним: БЦУ, отримуючи раз на 4 секунди важливу інформацію через супутник, буде дистанційно контролювати судно, і у разі потреби дистанційно управляти ним.

Вказане речення висуває дуже серйозні вимоги щодо надійності системи зв'язку. Так, при втраті зв'язку, якщо автономна система одночасно не зможе знайти рішення, судно зможе перейти в аварійний режим [6]. Таким чином, запропоновані рішення також підвищують безпеку на судах.

Передбачається, що вся сукупність безпілотних суден буде безперервно контролюватися з центру управління. Для цього у БЦУ постійно стікається інформація від різнотипних джерел, за результатами аналізу якої оператори приймають рішення про необхідність втручання. Наприклад, при відхиленні судна від заданого маршруту або графіка руху на величину, що перевищує порогові значення, або при неможливості бортовими сенсорними системами ідентифікувати об'єкт, оператор може втручатися на трьох рівнях:

1. Непрямий контроль: автономна система контролює ситуацію при необхідності з боку оператора БЦУ оновити план подорожі під час рейсу, наприклад, через зміну погодних умов або для уникнути оголошеної зони заборони (наприклад, операції з ліквідації розливу нафти).

2. Пряме управління: автономна система все ще контролює судно, коли оператор наказує судну виконати певний маневр, наприклад, нахилитися, щоб дати підвітряний борт для проведення пошуково-рятувальної операції.

3. Управління ситуацією: вахтовий офіцер на березі безпосередньо керує кермом і підрулюючими пристроями безпілотного судна із "ситуаційної кімнати", схожої на повноцінний симулятор місії на містку, ігноруючи автономну систему.

Для адекватного реагування з боку операторів на ситуацію, що складається в оточуючому середовищі відносно віддаленого судна на основі інформації, що надходить від різнотипних джерел, необхідне визначити тип, обсяг і період оновлення необхідної інформації і правила та особливості її відображення на відповідних засобах берегового центру управління для ситуаційної обізнаності операторів і можливості застосування ними, в найгіршому випадку, прямого управління віддаленим судном.

На містку пілотованого судна капітан, його помічники та інші посадові особи постійно працюють над підвищенням своєї ситуаційної обізнаності, під якою розуміється сприйняття елементів навколишнього середовища в обсязі часу і простору, розуміння їх значення і прогнозування їх стану в найближчому майбутньому. На містку ситуаційна обізнаність досягається за допомогою засобів моніторингу (радарі і системи електронної карти), візуального спостереження за обстановкою за бортом і відчуття рухів і вібрацій судна. Для опису знань судноводія на містку та його відчуттів при управлінні судном використовується термін "відчуття судна" [7], [12].

Вміння орієнтуватися на судні – це не тільки збір і використання інформації, що надається навігаційними приладами. Але є багато ситуацій, коли посадові особи користуються візуальною інформацією, наприклад, на близьких відстанях від інших об'єктів (плавання через архіпелаг або маневрування в порту), тобто в ситуаціях, коли є багато доступних об'єктів, які можуть бути використані як орієнтири.

Але на трансокеанській фазі плавання посадові особи на судні виконують, в основному, моніторингову функцію, а через брак візуальних орієнтирів для ситуаційної обізнаності основна інформація надходить від морських приладів. Однак несприятлива погода і високий стан моря можуть і часто призводять до відключення автопілоту, коли від моніторингової місії на містку необхідно переходити до ручного керування судном для отримання більш плавного

ходу [7]. У поточному стані моря для забезпечення безпеки судна, його вантажу та екіпажу судноводій повинен знати, коли необхідно виконувати необхідні еволюції, зменшуючи швидкість або змінюючи курс відносно напрямку зустрічних хвиль, тобто відчутти рух судна.

Ці знання про ситуаційну обізнаність судноводій отримує не від приладів на борту судна, а від своїх органів чуття, тобто відчуваючи рухи судна в стані хвилювання, слухаючи і відчуваючи стукіт після падіння носу судна в прохід після високого підйому на останній хвилі, а також візуально вивчаючи хвильову картину [12].

Таким чином, судноводій за допомогою свого відчуття судна і знання його маневрених характеристик може активізувати маневрові дії для утримання судна в гармонії з навколишнім середовищем для досягнення безпечного плавання судна, екіпажу і вантажу [12].

Таким чином, у системі «судно-оператор-навколишнє середовище» виділяється людський фактор як одна з головних складових, що впливає на досягнення головної мети місії судна [8-10]. Для пілотованих суден досягнення взаємної гармонії між елементами вказаної соціотехнічної системи залежить від рівня ситуаційної обізнаності судноводія (оператора), яку можна досягти під час маневрування, у тому числі за рахунок інтуїтивного (суднового) відчуття, де сприйняття і пізнання є ключовими з точки зору людського фактору. При виконанні маневрування інформація збирається через органи чуття моряків за допомогою різних рецепторів сприйняття. Далі моряк за допомогою свого досвіду і знань аналізує ситуацію, що склалася, і визначає пріоритети інформації, що надходить. І хоча межі усвідомлення ситуації людиною обмежені, пропуск якоїсь важливої інформації при перебуванні оператора і судна в одному просторовому русі є майже неможливою подією. І тут для комплексної оцінки ризиків головне значення мають, насамперед, чутті візуального, слухового або кінетичного сприйняття. Однак впровадження концепції безпілотних суден докорінно змінює підтримку високого рівня ситуаційної обізнаності. Іншими словами, фактори, що викликають відчуття судна на борту, повинні бути перенесені на берег для безпілотних систем. При цьому виникають ряд проблем, які необхідно вирішувати.

По-перше, відсутність фізичного зв'язку між оператором і судном не дозволить безпосередньо сприймати інформацію з навколишнього середовища, особливо за рахунок візуальних рецепторів, які є найважливішим для екіпажу судна при моніторингу й управлінні. Тому оператор в береговому центрі управління не може однозначно ідентифікувати стан навколишнього середовища у поточний момент часу і необхідну модель поведінки судна. Одним з можливих і, здається, найпростіших рішень у такій ситуації є налагодження безперервного збору і передачі на берег динамічної інформації, пов'язаної з безпекою і навігацією судна. Разом з тим, такий підхід не вирішує питання поглинання інформації через різні рівні її сприйняття при усвідомленні ситуації.

По-друге, інтуїтивна ментальна модель, яка зазвичай використовується для прийняття рішення про пріоритетність інформації, у випадку маневрування безекіпажними суднами не є доступною [13]. Тому користувачі на березі для дистанційного моніторингу й управління безпілотним судном повинні ґрунтуватися на новій моделі, що трансформує традиційну "бортову ментальну модель" у модель, застосовувану до сценаріїв управління судном з берегу за рахунок більш високого рівня ситуаційної обізнаності оператора.

По-третє, обізнаність про ситуацію як результат процесу накопичення продукту [14] постійно розвивається. Інформація, отримана в один конкретний момент часу і миттєво доставлена на берег, не надає високий рівень обізнаності оператору про ситуацію через відсутність передісторії, тобто динаміки розвитку ситуації. З іншого боку, постійне оновлення інформації може привести до інформаційного перевантаження. Таким чином, для берегового центру управління необхідно виявити обсяг і період оновлення інформації, що надходить, в плані ситуаційної обізнаності. Причому створення одномоментної ситуаційної обізнаності є набагато простішим завданням ніж відстеження динаміки розвитку ситуації.

Отже, для підтримання високого рівня ситуаційної обізнаності при перенесенні людського фактору з судна на берег в динамічних безекіпажних системах урахування необхідно більш глибоко враховувати людський фактор. Тому обсяги і період оновлення інформації та

інтерактивні підходи – це основні питання, які необхідно вирішити для використання берегової системи.

Для з'ясування необхідної для ситуаційної обізнаності інформації в БЦУ проведено фокус-групове інтерв'ю з судноводіями, які мають досвід роботи на різних типах суден. Усю інформацію, що надходить на судно і забезпечує обізнаність віддаленого оператора про ситуацію, запропоновано об'єднати у 9 різних груп.

1. Подорож – дані про план рейсу та маршрут, перелік пунктів звітності, контроль за огинаючою рейсу, встановлення порогових параметрів для тривоги, які будуть змінюватися під час рейсу (наприклад, мінімально допустима глибина, мінімально допустима відстань до інших суден, землі і т. д.), оновлення статичних повідомлень суднової АІС, паливної ситуації, щоденні оновлення від погодних маршрутних служб тощо.

2. Плавання – це стандартна інформація, відображувана на містку судна: місцезнаходження, курс, кут нахилу керма, швидкість повороту, швидкість по воді, основна навігаційна інформація "всередині навігаційного ящика" тощо. При русі судна за запланованим маршрутом розглядається "безпечна гавань" – прямокутник, що рухається вздовж запланованої траси і являє очікувану позицію і часовий інтервал, в межах якого судно має перебувати, якщо рейс буде проходити за планом. Якщо судно з якихось причин виходить за межі цього прямокутника, оператор отримує відповідне повідомлення.

3. Спостереження – бортова система датчиків об'єднує інформацію з радара, АІС і денних та інфрачервоних відеокамер в автономну систему ідентифікації об'єктів, яка ідентифікує інші судна, їх курс, швидкість і положення і надсилає цю інформацію автономному судновому контролеру, який буде діяти відповідно до МПЗС-72, і на картографічну систему в БЦУ. Автономна система ідентифікації об'єктів має виявляти об'єкти не гірше, ніж і людина, що спостерігає, але з цілодобовою пильністю, що перевищує людські можливості. При неможливості ідентифікувати об'єкт системою зображення надсилається на берег для ідентифікації.

Але автономна система ідентифікації об'єктів і віддалений оператор мають проблеми при плаванні в "обмеженій видимості" і з "безпечною швидкістю", які не мають числового визначення в COLREGS. Для отримання інформації про рух безекіпажного судна пропонується на борту мати певні прилади (еквіваленти гіроскопа), що можуть відчувати диферент, крен і вібрації, небезпечні для структурної цілісності корпусу, що виникають внаслідок ударів і зеленої води на палубу, відстежуватися і надсилатися до берегового центру для відображення зрозумілим для оператора способом, щоб він мав повне уявлення про стан судна.

4. Безпека і надзвичайні ситуації – інформація про пожежогасіння, потрапляння води, трюмні насоси, водонепроникні двері, поводження з якорями, внутрішні системи гучномовців для зв'язку з командою технічного обслуговування тощо.

5. Безпека – інформація про секретний вхід на безпілотне судно; записи про стан дверей, що дозволить оператору відстежувати авторизованих осіб (наприклад, команду технічного обслуговування), а також можливих зловмисників або безбілетників на борту, які можуть поставити під загрозу цілісність судна в рамках Міжнародної системи охорони суден і портових засобів; зображення з камер відеоспостереження з судна (машинне відділення, лоцманський трап, вантажні трюми, загальні внутрішні та палубні простори тощо).

6. Вантаж, остійність і міцність – інформація про автономну систему остійності і списки рівнів в танках; дані про ручне управління баластними водами; інформація про стан вантажу (моніторинг температури, вологості та вентиляції для всіх вантажних трюмів, моніторинг водотоннажності).

7. Технічні – дані про параметри двигуна, який контролюється бортовою автономною системою управління. двигуном, При нормальній роботі двигуна на берег надсилається лише дуже обмежений обсяг інформації. Інженер у БЦУ може запитувати і контролювати всі доступні параметри і доступні точки, а також планувати технічне обслуговування і ремонт.

8. Береговий центр управління – голосовий зв'язок з іншими суднами, Navtex, навігаційні попередження, текстові повідомлення АІС, інформація про оперативний режим роботи

безпілотного судна тощо. Безпілотне судно чітко розпізнається за допомогою розпізнавальних знаків, спеціальних ліхтарів, спеціального позначення АІС і т. д., але воно зобов'язане слухати і відповідати на всі радіоканали і канали лиха так само, як і пілотоване судно, через берегового оператора з розрахунковою затримкою, як і при звичайному супутниковому виклику.

Судно, з точки зору берега, може перебувати в ручному, автономному, дистанційному або аварійному режимах.

У ручному режимі судном керує бортова команда або пілот, який прямує з порту до точки автономного плавання, в автономному – автономна бортова система, при дистанційному керуванні – береговий центр управління. В аварійний режим (наприклад, дрейф у відкритому морі, хитавиця в обмеженому просторі або зняття з якоря, якщо судно знаходиться близько до підвітряного берега) судно переходить через певний час, якщо зв'язок з берегом втрачено або якщо трапляються інші надзвичайні ситуації.

Через достатньо високу вартість супутникового зв'язку береговий оператор повинен відстежувати доступні супутникові канали і пропускну здатність, а передача всіх параметрів у режимі реального відбуватиметься лише за умови їх необхідності.

Для збирання статистики, побудови довіри на початкових етапах експлуатації безпілотного судна передбачається надсилання журналу подій автономного судового контролера.

9. Адміністративна – реєстрована на судні інформація, наприклад, VDR – Voyage Data Recorder.

Інші виняткові ситуації, з якими важко впоратися на безпілотних суднах, – це обмерзання судна, зміщення вантажу, кран, що капає, двері, що не зачиняються належним чином, сміттєвий бак, що впав, тощо, які на безпілотному судні можуть перерости в серйозні неприємності.

Отже, залишена важлива роль у людини у безпілотних суднах може привести до можливості появи помилок.

1. Нерозуміння або помилкове розуміння справжньої ситуації на судні від електронної карти з інформацією АІС і прогнозованими параметрами маневрування, радарів і системи камер.

2. Непорозуміння при взаємодії з пілотованими суднами: відставання в УКХ-зв'язку, поганий зв'язок, мовні проблеми, аналогічні, як і для пілотованих систем, але погіршені через недостатню обізнаність про ситуацію через незнання оператором БЦУ місцевих умов.

3. Затримки в прийнятті рішень оператором через його знаходження "поза циклом" і необхідність певного часу для того, щоб увійти в курс справи.

4. Можливе інформаційне перевантаження і стрес через зосередження уваги оператора на декількох суднах одночасно.

5. "Ефект перенесення" між двома суднами через необхідність стеження оператора за кількома суднами одночасно.

6. Нemoжливість засобами автоматизації впоратися з погодними умовами і можливими проблемами зі зв'язком для забезпечення належного відчуття судна при ручному управлінні.

Положення безпілотного судна та інших суден поблизу нього, план рейсу судна (запланований шлях і запланований часовий інтервал, "навігаційний ящик"), огинаюча маневрування постійно передаються на береговий пульт управління і відображається на електронній карті.

Бортова система ідентифікації об'єктів у звичайному режимі роботи обробляє інформацію з радарів і дані АІС, а за запитом – радіолокаційні зображення з судових радарів передаються на береговий пульт управління.

Висновки. Безпілотна система є щонайменше не менш безпечною, ніж пілотована.

Автономна система не усуває людську помилку як причину аварій, а лише змінює роль оператора і складність його діяльності в автономних системах.

Як відомо з теорії експлуатації, на початковому етапі впровадження безкіпажних суден технічні поломки, ймовірно, відіграватимуть велику роль, яка суттєво знизиться в міру накопичення досвіду.

ЛІТЕРАТУРА

1. SANDQUIST, T. F., 'Human Factors in Maritime Applications: A New Opportunity for Multi-Modal Transportation Research', Proceedings of the Human Factors 36th Annual Meeting.1992.
2. BLANDING, H. C., 'Automation of Ships and the Human Factor', Ship Technology and Research Symposium of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Philadelphia, PA, 1987.
3. ROTHBLUM, A. M., 'Human Error and Marine Safety', US Coast Guard. http://www.bowles-langle.com/wp-content/files_mf/humanerrorandmarinesafety26.pdf. 2002. [acc. 2024-02-04].
4. FISCHER, E. (2011), 'Justifying automation', Railway-technology.com, 2011. <http://www.railway-technology.com/features/feature127703>. [acc. 2024-02-04]
5. STEPHENSON, A. G., LAPIANA, L. S., MULVILLE, D. R., RUTLEDGE, P. J., BAUER, F. H., FOLTA, D.; DUKEMAN, G. A., SACKHEIM, R.; NORVIG, P. 'Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report'. NASA 2010.
6. RODSETH, O. J., KVAMSTAD, B., PORATHE, T., AND BURMEISTER, H.-C., 'Communication Architecture for an Unmanned Merchant Ship', Proceedings of OCEANS, Bergen, 2013 MTS/IEEE, 2013, pp. 1-9.
7. PRISON, J., DAHLMAN, J., and LUNDH, M. 'Ship sense – striving for harmony in ship manoeuvring. WMU Journal of Maritime Affairs, 12(1), 115-127, World Maritime University, 2013
8. INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION: <http://www.iea.cc/whats/index.html> [acc. 2014-01-10].
9. KOESTER, T., 'Terminology work in maritime human factors. Situations and sociotechnical systems', Copenhagen: Frydenlund Publishers, 2007.
10. EDWARDS, E., 'Man and machine: Systems for safety', Proceedings of the British Airline Pilots Associations Technical Symposium, 21-36. 1972.
11. CARIOU P. 'Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?', Elsevier, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16 (3), pp. 260–264. 2011.
12. PRISON, J., 'Ship sense – exploring the constituents of shiphandling'. Licentiate thesis, Technical report no. 13:146, ISSN 1652-9189, Chalmers University of Technology 2013.
13. ENDSLEY, M. R. (2012). Designing for Situation Awareness: an Approach to User-Centered Design. Boca Raton, FL: CRC Press.
14. ENDSLEY, M. R. Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review. In M. R. ENDSLEY & D. J. GARLAND (Eds), Situation awareness analysis and measurement (pp. 3-32). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum. 2000

REFERENCES

1. SANDQUIST, T. F., 'Human Factors in Maritime Applications: A New Opportunity for Multi-Modal Transportation Research', Proceedings of the Human Factors 36th Annual Meeting.1992.
2. BLANDING, H. C., 'Automation of Ships and the Human Factor', Ship Technology and Research Symposium of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Philadelphia, PA, 1987.
3. ROTHBLUM, A. M., 'Human Error and Marine Safety', US Coast Guard. http://www.bowles-langle.com/wp-content/files_mf/humanerrorandmarinesafety26.pdf. 2002. [acc. 2024-02-04].
4. FISCHER, E. (2011), 'Justifying automation', Railway-technology.com, 2011. <http://www.railway-technology.com/features/feature127703>. [acc. 2024-02-04]
5. STEPHENSON, A. G., LAPIANA, L. S., MULVILLE, D. R., RUTLEDGE, P. J., BAUER, F. H., FOLTA, D.; DUKEMAN, G. A., SACKHEIM, R.; NORVIG, P. 'Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report'. NASA 2010.
6. RODSETH, O. J., KVAMSTAD, B., PORATHE, T., AND BURMEISTER, H.-C., 'Communication Architecture for an Unmanned Merchant Ship', Proceedings of OCEANS, Bergen, 2013 MTS/IEEE, 2013, pp. 1-9.

7. PRISON, J., DAHLMAN, J., and LUNDH, M. 'Ship sense – striving for harmony in ship manoeuvring. WMU Journal of Maritime Affairs, 12(1), 115-127, World Maritime University, 2013
8. INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION: <http://www.iea.cc/whats/index.html> [acc. 2014-01-10].
9. KOESTER, T., 'Terminology work in maritime human factors. Situations and sociotechnical systems', Copenhagen: Frydenlund Publishers, 2007.
10. EDWARDS, E., 'Man and machine: Systems for safety', Proceedings of the British Airline Pilots Associations Technical Symposium, 21-36. 1972.
11. CARIOU P. 'Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?', Elsevier, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16 (3), pp. 260–264. 2011.
12. PRISON, J., 'Ship sense – exploring the constituents of shiphandling'. Licentiate thesis, Technical report no. 13:146, ISSN 1652-9189, Chalmers University of Technology 2013.
13. ENDSLEY, M. R. (2012). Designing for Situation Awareness: an Approach to User-Centered Design. Boca Raton, FL: CRC Press.
14. ENDSLEY, M. R. Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review. In M. R. ENDSLEY & D. J. GARLAND (Eds), Situation awareness analysis and measurement (pp. 3-32). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum. 2000

Tymochko O.I., Tymoshchuk O.M., Rudenko V.M., Sitkov O.M.

SITUATIONAL AWARENESS OF OPERATORS OF COASTAL CONTROL CENTRES AS A BASIC PREREQUISITE FOR THE SAFE OPERATION OF AUTONOMOUS UNMANNED VESSELS

The aim of the study is to investigate the situational awareness of operators of coastal control centres for the safe operation of unmanned autonomous vessels. This goal is achieved by analysing the main solutions aimed at expanding the area of unmanned navigation of autonomous unmanned vessels. A detailed analysis of the MUNIN project for an autonomous unmanned transoceanic voyage on a large dry cargo ship has shown that only the transoceanic segment has autonomous unmanned control. The scheme of organising the management of an unmanned vessel and the peculiarities of its management in the areas of entry (exit) to (from) the port(s) are investigated. The leading role of information and telecommunication technologies for the transfer of information on board ships, between ships and between ships and coastal services is emphasised. Rational speeds for crewless ships to reduce exhaust gas emissions are proposed. The features of unmanned and autonomous vessels are identified and compared. The leading role of the human factor in the system "unmanned vessel-operator-environment" is emphasised, which affects the achievement of the main goal of the vessel's mission. The necessity of maintaining a high level of situational awareness when transferring the human factor from ship to shore in dynamic unmanned systems and a deeper consideration of the human factor is proved. It has been found that the volume and period of updating the incoming information to the shore-based control centre is one of the key factors in terms of situational awareness of the operator who controls an unmanned vessel. The principles of grouping the information received by the vessel and ensuring the remote operator's situational awareness are proposed. The most significant result of the study is a critical analysis of the subject area and proof of the important role of humans in the safe operation of unmanned vessels, possible mistakes that an operator may make, and ways to overcome them. The future direction of the work is to conduct research to establish the peculiarities of managing an unmanned vessel when using e-navigation.

Keywords: autonomous vessel, unmanned vessel, e-navigation, situational awareness, operator, information, control.

Гусак І.Л., Ярмак В.Л.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО РОЗРОБКИ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ

У ході дослідження запропоновано способи завдання траєкторії руху судна для різних районів плавання із властивими ним умовами навігації, що базуються на методах аналітичної геометрії та фізичних принципах маневрування судном. Використаний математичний апарат для завдання ліній траєкторій довів його ефективність, що полегшує роботу автоматичних регуляторів. Для кожного з типів траєкторій розроблений відповідний за функціоналом принцип формування управляючих впливів та псевдоуправління, що базується на теорії автоматичного управління. Регулятори базуються на принципах ПІД-управління. Введення додаткового каналу кутового прискорення при управлінні нестійким на курсі судном дозволяє перетворити коливальні перехідні процеси в аперіодичні. Даний підхід розширює область стійкості системи управління й суттєво підвищує якість управління за критеріями економічності й безпеки за рахунок можливості підвищення коефіцієнта підсилення системи управління. За результатами моделювання руху судна на кожному з типів траєкторій з обраним для них регулятором відхилення від заданих траєкторій не перевищують допустимого за критеріями безпеки значення для кожного з районів плавання.

Ключові слова: автоматизація, судноводіння, база знань, безпека судноводіння, зона небезпеки, інформаційна підтримка прийняття рішень, маневрування, маршрут судна, модель, навігаційна небезпека, навігаційна обстановка, обмеження плавання, переешкода, порт, портова акваторія, прийняття рішення, програмне значення курсу, система управління безпекою, судноводій, судноводіння, траєкторія, управління рухом судна, формалізація, штучний інтелект.

Актуальність теми дослідження. Складність умов навігації при русі судна у стиснених умовах – каналах, протоках, фарватерах, на мілководді та в районах з обмеженою акваторією – обумовлена впливом різноманітних факторів: навігаційний запас, ширина і глибина фарватеру (каналу), течії, вітер, топографія місцевості, стан головного двигуна (ГД) та рульового обладнання (РО), взаємне розташування суден тощо. Вони визначають типи навігаційних ризиків, які впливають на появу загроз і є передвісником інцидентів і катастроф [1]. Поява загроз обумовлена низкою об'єктивних (ризики відмов складних технічних систем судна, зіткнення з небажаними умовами і т. д.) і суб'єктивних (ризики неадекватної оцінки обстановки і, відповідно, вироблення некоректного рішення) ризиків. Отже, навігаційна безпека судноводіння забезпечується цілеспрямованою роботою щодо управління, попередження та мінімізації ризиків [2].

Впровадження на морському флоті автоматичної ідентифікаційної системи, що є морською навігаційною системою, в якій використовується взаємний автоматизований інформаційний радіообмін як між суднами, так і між судном і береговими службами, під час якого передають інформацію про позивний і назву кожного судна (для їхнього розпізнавання), їхні координати, параметри (розміри, вантаж, осадку та ін.), мету рейсу, параметри руху (курс, швидкість тощо) для розв'язання завдань запобігання зіткненням суден, контролю за дотриманням ними режиму плавання і загального моніторингу[3].

Доповнення глобальних навігаційних супутникових систем контрольно-коригувальними станціями розв'язує проблему високоточного визначення місця судна із субметровою точністю. Це забезпечить безпечніше плавання суден в умовах поганої видимості; виконання спеціальних

робіт (поглиблення каналів, будівництво хвилеломних і портових споруд, нафтових терміналів); точніше виставляння плавучих засобів навігаційного обладнання для покращення якості обслуговування суден у порту.

Незважаючи на широке впровадження систем високоточної навігації і засобів АІС, є актуальним вирішення наукового завдання щодо розроблення моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Метою даного дослідження полягає у розробці теоретичних і науково-методичних засад щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії.

Аналіз останніх досліджень. Загалом, дослідження у сфері обслуговування руху суден, особливо у портах, було дуже локалізованим, наприклад, впровадження ланцюгового планування в деяких європейських портах [4]. Більшість досліджень у даній сфері стосувалися розробки обладнання з акцентом на інструментах підтримки прийняття рішень для операторів.

Так, частка досліджень була зосереджена на джерелах даних і об'єднанні інформації для виявлення і відстеження суден. Дослідження [5-9], в основному, зосереджені на математичному моделюванні для підтримки людини-оператора за допомогою джерел інформації, об'єднаних в систему підтримки прийняття рішень. Однак, лише незначна увага приділяється повсякденній експлуатації, а людина-оператор розглядається як джерело збоїв.

На противагу цьому, важливість врахування інтересів кінцевих користувачів під час розробки систем підтримки прийняття рішень була підкреслена у роботах [10, 11], де автори використовували фокус-групи для оцінки поінформованості про ситуацію і демонстрації того, що оператори діяли протягом більш тривалого періоду часу, ніж очікувалося, і одержували підтримку від відповідної системи. Хоча предиктор був здатний передбачити шлях судна на одну хвилину вперед, оператори продемонстрували, що їхні рішення були правильними й оперативними.

Інший напрямок досліджень був зосереджений на визначенні основних завдань та методів роботи, щоб задовольнити майбутні потреби у транспортних перевезеннях. Так, автори [12] основний акцент спрямували на керівництво морськими рятувальними операціями, у тому числі у порту. Крім того, практика і процедури відрізнялися в різних портах внаслідок місцевих особливостей. У результаті надання послуг може відрізнитися в різних портах. Отже, ці відмінності можуть призвести до невизначеності у сфері обслуговування руху суден, що спричиняє труднощі для суден у розумінні того, чого можна очікувати від постачальника послуг, оператора і очікуваної реакції суден. Тобто ще залишається значний обсяг невиконаних досліджень щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії, що враховують особливості портів й ситуацій у них.

Виклад основного матеріалу. Стиснуті води через посадки на міліну, зіткнення, навали на причальні спорудження та пришвартовані судна вважаються найнебезпечнішим для судноводіння районом плавання [1]. Це обумовлено підвищеним потоком й інтенсивним маневруванням суден, швидкою зміною навігаційної обстановки, впливом приливних течій, наявністю банок і мілководдя.

Для забезпечення безпеки судноплавства у стиснутих водах Резолюція ІМО вимагає ретельного планування маршруту й маневрів згідно з такими вихідними даними [2]:

- а) точки початку і кінця повороту з урахуванням маневрених елементів, гідрометеорологічних та інших факторів навколишнього середовища;
- б) фактори забезпечення безпечної проводки й постановки до причалу (режими роботи ГД, рульового обладнання, швидкість та орієнтацію судна в момент контакту із причалом);
- в) встановлена безпечна швидкість поблизу навігаційних небезпек і причальних споруджень.

Траєкторія в стиснутих водах є комбінацією прямих і дуг окружностей. Вибір максимального кута між прямими (або дотичними за дугами окружностей у точці сполучення) й дотичними до дуг окружностей наступної ділянки траєкторії здійснюється за критерієм мінімізації відхилення судна від заданої траєкторії з врахуванням маневрених характеристик

судна.

Дуги окружності задаються рівняннями утворюючих їх окружностей: $(x_p - X_c)^2 + (y_p - Y_c)^2 = R_o^2$, де X_c, Y_c – координати центру окружності; R_o – радіус окружності.

Відхилення від траєкторії, заданою дугою окружності, є різницею між дистанцією від поточного положення до центру окружності та її радіусом:

$$\chi = \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} - R_o. \quad (1)$$

Точки початку й кінця дуги визначаються автоматично за навігаційною обстановкою на карті, тому їх непотрібно визначати аналітично.

Регулятор відрізняється наявністю в диференціальному каналі заданої кутової швидкості для підвищення точності управління, враховуючи кривизну траєкторії. Задана кутова швидкість визначається через радіус кривизни поточної ділянки траєкторії й поточну поздовжню швидкість.

$$\omega_p = \frac{v}{R_o}. \quad (2)$$

При перевищенні заданою кутовою швидкістю максимальної кутової, яку судно здатне розвинути при максимальній перекладці керма, необхідно завчасно знизити поздовжню швидкість. і, якщо буде При недостатності цих заходів для збільшення упору потоку води на пері керма необхідно давати поштовхи машиною, тобто маневрування швидкістю є складним заходом.

Для автоматичної навігації при здійсненні проводки за траєкторією попередньо планується поздовжня швидкість або дискрети ходу ГД для різних ділянок траєкторії з її подальшим автоматичним корегуванням.

Морська практика і результати модельних експериментів доводять основні переваги завдання траєкторії дугами окружностей:

- 1) простота контролю положення судна щодо траєкторії;
- 2) простота опису траєкторії, коли задаються координати центру, радіус і полярні координати початку й кінця дуги;
- 3) простота управління, що забезпечує мінімум керуючих впливів.

Прийняте рішення про постановку до причалу порту у сукупності з різноманітним навігаційним, гідрометеорологічним та іншим факторів свідчать про практичну неповторюваність виконання судноводієм даного завдання [2]. Це підтверджує практика маневрування в стиснутих акваторіях і при швартових операціях, коли постфактум судноводії не можуть чітко визначити причинно-наслідковий зв'язок обставин проводки та прийняття рішень щодо виконання того або іншого виду маневру [3]. Також при рівнозначних умовах дії лоцмана при постановці до одного причалу різних суден суттєво відрізняються. Отже, на порядок денний виходить завдання формалізації та уніфікації траєкторій й способів проводки за нею суден в умовах обмеженої акваторії портів та підходів до причальних споруджень.

Математична модель формування програмних рухів судна гладкими кривими у портовій акваторії описується апроксимуючою сигмоїдальною траєкторною функцією (СТФ) $\Pi^c(S)$, яка описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах:

$$\Pi^c(S) = - \frac{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c}{1 + \exp\left(4(S_{\Pi}^c + \Delta S_{\Pi}^c - S_i) \frac{g_{\Pi_{mn}^c}}{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c} R_{\Pi}^c\right)}, \quad (3)$$

де mn – індекс значення параметра у середній точці перехідного періоду маневру;

ΔS_{Π}^c – поправка, що враховує зсув СТФ за початкових умов маневру;

S_i, S_{Π}^c – відстань за траєкторією від початкової позиції до поточної до точки перегину СТФ;
 R_{Π}^c – коефіцієнт зміни нахилу СТФ від управляючого впливу;
 $\Pi^c, \Pi_{max}^c, \Pi_0^c$ – кінематичний параметр, його максимальне та початкове значення відповідно.

У СППР судноводія задані кінематичні параметри судна (курс, кутова й поздовжня швидкості) визначатимуться як градієнти за траєкторією (рис. 1).

Перевизначимо задану поздовжню швидкість за траєкторією $v(S)$ в залежність від часу, використовуючи відомі фізичні співвідношення:

$$\begin{aligned} v(S) &= \frac{dS}{dt}; \\ t &= \int dt = \int \frac{dS}{v(S)}; \\ t &= \frac{S_i}{v_{max}^c - v_0^c} - \frac{\exp\left(4(S_v^c + \Delta S_v^c - S_i) \frac{g v_{mn}^c R_v^c}{v_{max}^c - v_0^c}\right)}{g v_{mn}^c R_v^c}, \end{aligned} \quad (4)$$

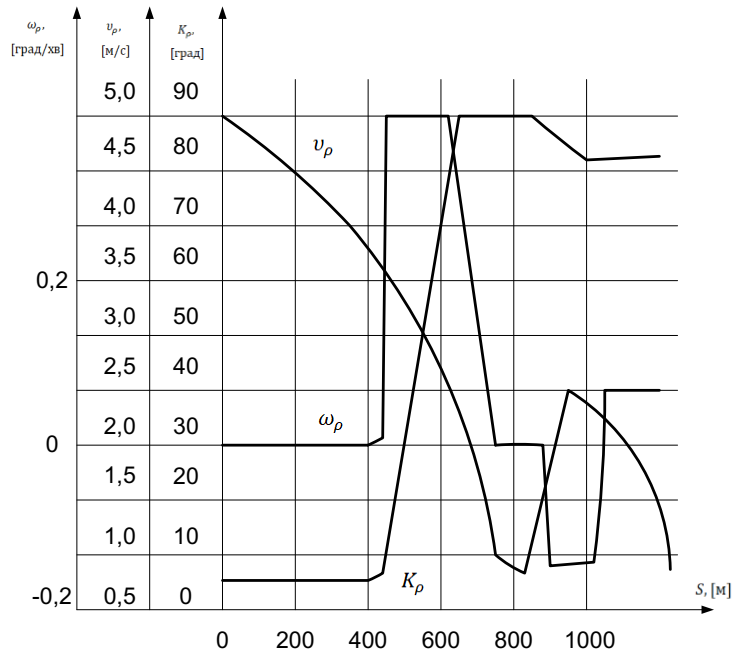


Рисунок 1 – Градієнти кінематичних параметрів руху судна за траєкторією
 (Джерело: розроблено автором)

де v_{max}^c, v_0^c – максимальне й початкове значення поздовжньої швидкості.

Побудуємо залежність пройденої відстані за траєкторією від часу (рис. 2).

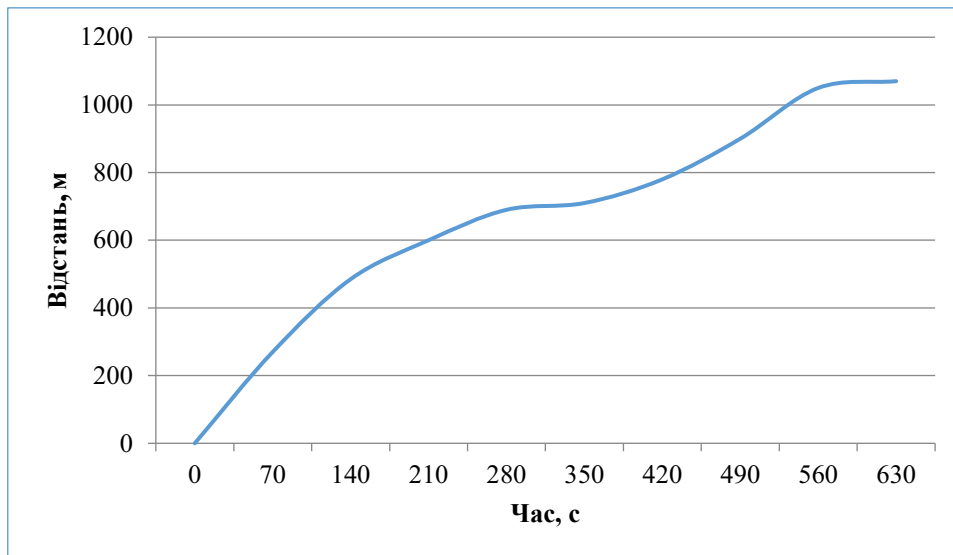


Рисунок 2 – Зміна пройденої за траєкторією відстані з часом
(Джерело: розроблено автором)

Отримана залежність $S(t)$ підставляється у формулу (4) та знаходяться залежності $v(t)$, $K(t)$, $\omega(t)$.

Множина координат точок заданої СТФ траєкторії визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} x_p = X_0 + \int v_p(t) \sin(K_p(t) + a_p(t)) dt; \\ y_p = Y_0 + \int v_p(t) \cos(K_p(t) + a_p(t)) dt, \end{cases} \quad (5)$$

де v_p , K_p – задані у формі сигмоїдальних функцій швидкість і курс;

a_p – заданий кут дрейфу;

X_0 , Y_0 – початкові координати траєкторії.

Підстановка кінематичних параметрів вигляду (4) до системи рівнянь (5) робить останню складною і не дозволяє визначити відхилення судна від заданої СТФ траєкторії аналітично. Тому відстань від точки з координатами (X, Y) до найближчої точки траєкторії з координатами (x_p, y_p) , що належать множині координат точок заданої траєкторії, знаходиться повним перебором:

$$\chi = \min \left\{ \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} \right\}. \quad (6)$$

Проведене моделювання управління судном за траєкторією показало переваги завдання траєкторії СТФ:

- 1) об'єкт управління може фізично реалізувати задану траєкторію;
- 2) траєкторія задається безперервною гладкою кривою;
- 3) не має потреби додаткового завдання точок початку маневру;

Недоліками завдання траєкторії СТФ є такі:

- 1) необхідність завдання всіх точок траєкторії з певною дискретністю;
- 2) складність визначення відхилення від траєкторії;
- 3) необхідність врахування взаємного впливу кінематичних параметрів.

Розглянемо автоматичне управління рухом судна у річковій акваторії (рис. 3). Нехай за

контрольний район плавання обрана ділянка акваторії ріки Міссісіпі з параметрами траєкторії.

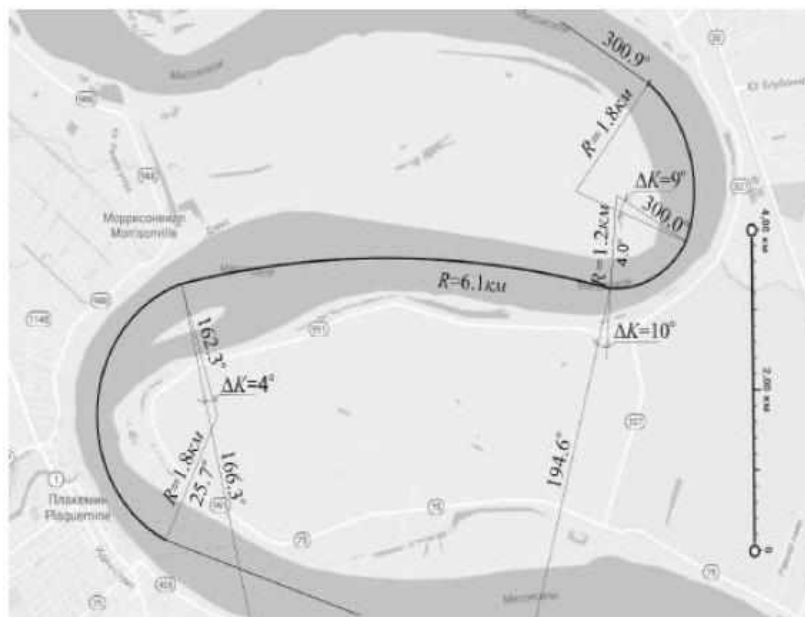


Рис. 3 – Траєкторія, задана дугами окружностей
(Джерело: розроблено автором)

Необхідно виконати S-подібний маневр й за визначеною траєкторією у вигляді трьох сполучених дуг окружності із заданими координатами центрів та радіусами. Координати точок сполучення дуг визначаються автоматично з електронної карти СППР безпеки судноводіння. Плануються точки початку й кінця маневру щодо переходу з однієї дуги на наступну.

Параметри регулятора, за якими метод є ефективним, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри регулятора (Джерело: розроблено автором)

Параметр	a_p	a_i	a_d	a_{dd}	b_p	b_i	b_d
Значення	4	0,002	-200	-2000	0,05	0,0005	0

Перемикання між режимами малий передній хід (МПХ), середній передній хід (СПХ), повний передній хід (ППХ) у маневреному режимі двигуна забезпечує управління швидкістю при проходженні каналів та річок.

Повна зупинка двигуна і режим самий малий передній хід (СМПХ) забезпечують безпечну розбіжність суден і прохід портових споруджень й ошвартованих суден, тобто до втримання судна на траєкторії не ставляться.

Механізм управління поздовжньою швидкістю на борту судна полягає в звичайному релейному перемиканні режимів роботи ГД, що змінює частоту обертання гвинта. Але метод на основі простого релейного перемикання буде неефективним, коли задана швидкість перебуває на границі діапазонів попередньо встановлених режимів роботи ГД. У цьому разі для дотримання заданої швидкості режими роботи машини будуть безупинно перемикатися. Цей недолік усувається використанням нечіткого регулятора, який працює у діапазоні заданих швидкостей, функції приналежності (ФП) яких вибираються лінійними трикутними з перетинанням діапазонів у межах 30% (рис. 4). Для режимів роботи машини функції задаються синглтонами (рис. 5).

За структуру нечіткої системи обрано Сугено, яка, на відміну від Мамдані, підтримує синглтонні ФП. На вхід нечіткого регулятора заданої швидкості подаються лінійні функції приналежності (крім ППХ). Нелінійні ФП перевантажують обчислювальні системи, скорочуючи їх швидкодію. Терм ППХ має сигмоїдальну ФП з областю значень $(-\infty; +\infty)$. Тому відсутня необхідність визначати максимальне значення заданої швидкості.

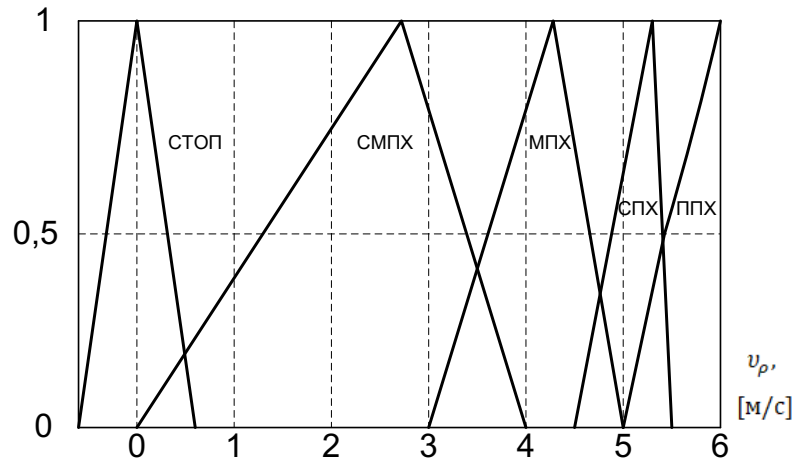


Рисунок 4 – Функції приналежності заданих поздовжніх швидкостей
(Джерело: розроблено автором)

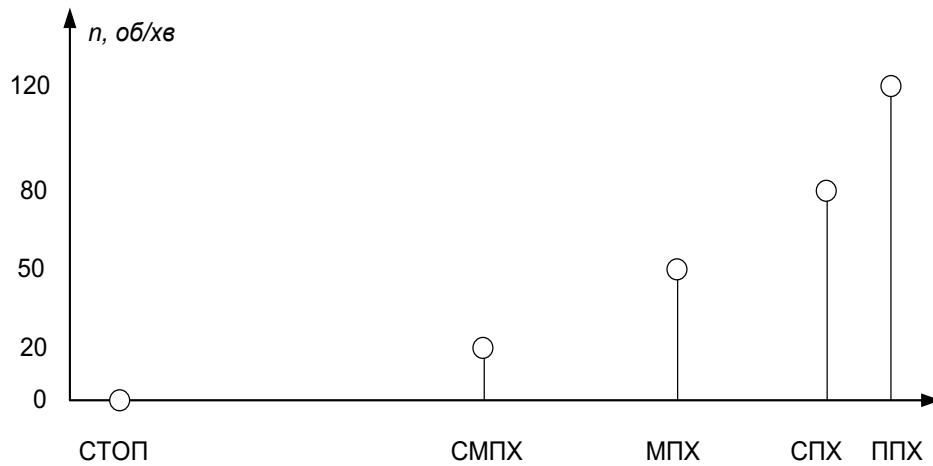


Рис. 5 – Відповідні режими роботи головних двигунів
(Джерело: розроблено автором)

За результатами моделювання (рис. 6) для ділянки акваторії ріки, зображеної на рис. 3, встановлено таке.

- 1) Утримання судна на траєкторії з постійним радіусом кривизни за допомогою регулятора (2) є адекватним з позиції судноводіння.
- 2) Відхилення на ділянках траєкторії з постійним радіусом кривизни не перевищує 10 м.
- 3) При переходах між дугами траєкторії виникають відхилення, які не перевищують 30 м.

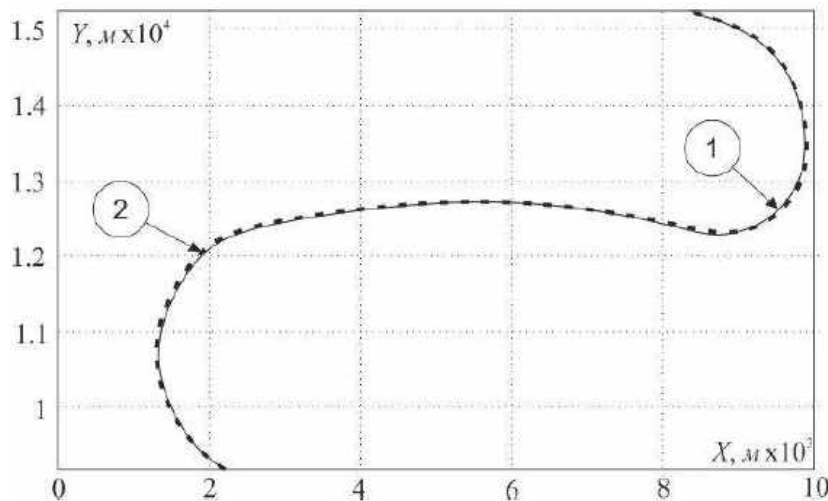


Рисунок 6 – Управління судном на криволінійній траєкторії:
1 – виконана траєкторія; 2 – програмна траєкторія
(Джерело: розроблено автором)

4) Одержані відхилення є допустимою помилкою управління, що обумовлена фізичною неможливістю судна повторити траєкторію, задану дугами окружностей в околиці її вершин.

За контрольну акваторію для моделювання процесів проводки судна до причалу розглянемо конфігурацію умовного порту, зображену на рис. 7, де крива 1 показує типовий трек судна при лоцманській проводці вхідних суден до причалу 3, а крива 2 – траєкторію, задану системою рівнянь (5).

Параметри для даного моделювання вибрані з таблиці 1, а структура й параметри регулятора курсу задані виразами (1-4). Отже, даний регулятор автоматично враховує радіус кривизни траєкторії, незалежно від того, чи він є постійним як у випадку дуг окружності, або змінним як у випадку сигмоїдальних функцій.

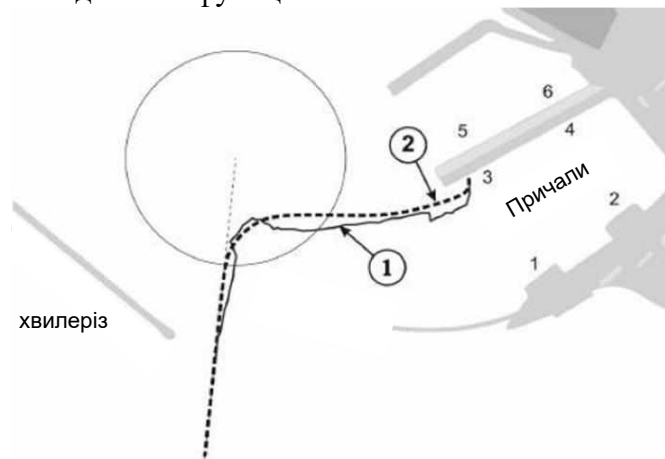


Рисунок 7 – Підхід до умовного порту
(Джерело: розроблено автором)

Регулятор поставив судно до причалу, але при цьому припустив два відхилення від заданої траєкторії (рис. 8). Це пояснюється недостатнім врахуванням зниження керованості судна при зниженні поздовжньої швидкості при завданні траєкторії траєкторними функціями, зміною поздовжньої швидкості залежно від кутової і нестачою ресурсів керованості судна.

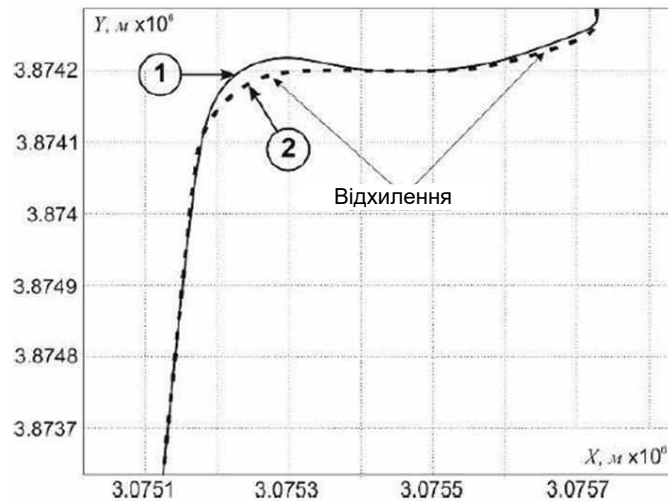


Рисунок 8 – Шлях судна та виниклі відхилення при русі за траєкторією
(Джерело: розроблено автором)

Дана проблема вирішується шляхом урахування у методі управління умов, коли регулятор надає машині необхідні впливи при недостатній ефективності керма. Крім того, для більш пологої й завчасної зміни курсу і кутової швидкості корегуються траєкторні функції. Нарешті, на ділянках з відхиленнями для подолання нестачі ресурсів можливе використання буксирів.

Висновки. На основі теорії автоматичного управління розроблені принципи формування управляючих впливів для кожного з типів траєкторій. Введення додаткового каналу кутового прискорення дозволяє перетворити коливальні перехідні процеси в аперіодичні при управлінні нестійким на курсі судном, що розширює область стійкості системи управління й підвищує якість управління судном.

Запропонований метод управління рухом судна в портовій відрізняється застосуванням апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, яка описує режими зміни курсу, швидкості, куту дрейфу судна за певною траєкторією і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії.

За результатами моделювання руху судна підтверджено застосовність запропонованих регуляторів при рішенні завдань утримання судна на відповідних типах траєкторій.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.529 (13) Nov. 1983.
2. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.815 (19) Nov. 1983.
3. IMO / E-Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>.
4. Seignette, R. (2012). Vessel traffic management in the Port of Rotterdam. Port Technology International, 105-107.
5. Chang, S. J. (2004). Development and Analysis of AIS Applications as an Efficient Tool for Vessel Traffic Service. Paper presented at the OCEANS '04.
6. Høye, G. K., Eriksen, T., Meland, B. J., & Narheim, B. T. (2008). Space-based AIS for global maritime traffic monitoring Acta Astronautica, 62, 240-245.
7. Kao, S.-L., Lee, K.-T., Chang, K.-Y., & Ko, M.-D. (2007). A Fuzzy Logic Method for Collision

Avoidance in Vessel Traffic Service. The Journal of Navigation (60), 17-31.

8. Wawruch, R. (2004). Quality of information about tracked vessel in VTS centre. Paper presented at the 461h International Symposium Electronics in Marine, ELMAR-2004., Zadar. Croatia.

9. Vespe, M., Sciotti, M., Burro, F., Battistello, G., & Sorge, S. (2008). Decision Support Platforms for Satellite-Extended Vessel Traffic Services. Paper presented at the RADAR.

10. Wiersma, E., Jarvis, D., & Granholm, G. (2000). VTS Operator performance and acceptance of a short-term path prediction display in a low density traffic area. Paper presented at the IEA/HFES 2000 Congress.

11. Wiersma, J.W.F. , & Mastenbroek, N. (1998). Measurement of Vessel Traffic Service Operator Performance. AI & Society, 12, 78-86.

12. Nuutinen, M., Savioja, P., & Sonninen, S. (2007). Challenges of developing the complex socio-technical system: Realising the present, acknowledging the past, and envisaging the future of vessel traffic services. Applied Ergonomics, 28, 513-524. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2006.10.004>

Gusak I.L., Yarmak V.L.

PROPOSALS FOR THE DEVELOPMENT OF METHODS OF SHIP TRAFFIC CONTROL IN THE PORT WATER AREA

During the study, the methods of setting the ship's motion trajectory for different navigation areas with their inherent navigation conditions based on the methods of analytical geometry and physical principles of ship manoeuvring are proposed. The mathematical apparatus used for setting trajectory lines has proven to be effective, which facilitates the operation of automatic controllers. For each of the trajectory types, a functional principle of forming control influences and pseudo-controls based on the theory of automatic control has been developed. The controllers are based on the principles of PID control. The introduction of an additional angular acceleration channel in the control of an unstable ship makes it possible to convert oscillatory transients into aperiodic ones. This approach expands the stability range of the control system and significantly improves the quality of control in terms of efficiency and safety due to the possibility of increasing the control system gain. According to the results of modelling the ship's motion on each type of trajectory with the selected controller, the deviations from the given trajectories do not exceed the value permissible according to safety criteria for each of the navigation areas.

Keywords: automation, navigation, knowledge base, navigation safety, danger zone, decision support, manoeuvring, ship route, model, navigational hazard, navigational situation, navigation restrictions, obstacle, port, port area, decision making, programmed course value, safety management system, navigator, navigation, trajectory, ship motion control, formalisation, artificial intelligence.

Тараненко С.В., Кириченко О.С., Прістуна С.В., Голубєва С.М.

ДЕМПФУВАННЯ ТЕРМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛЯХ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Дослідження пов'язане з актуальними питаннями зменшення до прийнятного рівня термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. Термічні напруження виникають в них через теплові деформації в термоелектричних матеріалах внаслідок їх одночасного розширення та стискування при термоелектричному ефекті. На основі трьох створених моделей термоелектричних елементів шляхом їх з'єднання в термоелектричний ланцюг у формі П-подібної змійки сформовано три моделі відповідних термоелектричних модулів. Один модуль мав класичну конструкцію без демпфування, а два інших мали в своєму складі одношарові демпферні вставки з пластичного матеріалу. Кожен з цих термоелектричних модулів складався з термоелектричного ланцюга з 39 напівпровідникових Р-N-термопар, містив 20 напівпровідників Р-типу і 20 напівпровідників N-типу, 41 контактну комутаційну пластину. Габаритні розміри (без врахування товщини ізоляційного корпусу) у спроєктованих термоелектричних модулях класичної конструкції без демпфування та конструкцій з великими та малими демпферами були відповідно $30 \times 25,5 \times 7$ мм та $30 \times 25,5 \times 8$ мм. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими для дослідження цих пристроїв в більш напружених режимах роботи та для оцінки впливу на них максимальних термічних напружень. За результатами розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів по об'єму термоелектричних модулів. Побудовано та проаналізовано робочі характеристики термоелектричних модулів суднового електрообладнання при варіаціях робочого струму від 0 до 3 А для густини струму j , напруги U , напруженості електричного поля E , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ і деформацій ϵ . На основі отриманих результатів обрано найкращу конструкцію термоелектричного модуля, в якому демпферні вставки ефективно зменшують рівень термічних напружень. Показано переваги застосування сучасних чисельних методів розрахунку для вирішенні польових задач при проєктуванні суднового електрообладнання.

Ключові слова: термоелектричні модулі, проєктування, чисельні методи, термоелектричний ефект, термічні напруження, одношарове демпфування, суднове електрообладнання.

Постановка проблеми. Джерелом механічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання є температурні деформації. Вони пов'язані з одночасним тепловим розширенням і стискуванням через нагрів та охолодження в термоелектричних матеріалах внаслідок термоелектричного ефекту. В науковій та науково-методичній літературі для подібних механічних напружень досить часто використовується термін термічні напруження. Термічні напруження здатні завдати значної шкоди судновому електрообладнанню, інколи можуть призвести до небажаних поломок в термоелектричних вузлах суднового електрообладнання.

Способів повного усунення термічних напружень в класичних конструкціях термоелектричних модулів практично не існує, проте запропоновано ряд оригінальних конструктивних рішень для їх зменшення до прийнятного рівня. Одним з найбільш ефективних

конструктивних рішень, яке значно зменшує термічні напруження, є застосування одношарового демпфування або так званих демпферних вставок з пластичного матеріалу. В якості пластичного матеріалу цих вставок досить часто використовують свинець, вісмут або їх сплави.

Враховуючи вищезазначене актуальними залишаються питання дослідження одношарових демпферних вставок з пластичних матеріалів в термоелектричних модулях. Вони зменшують термічні напруження до прийнятного рівня для нормальної і безпечної роботи термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час проводиться багато вагомих досліджень щодо зниження негативного впливу термічних напружень в термоелектричних матеріалах при термоелектричних ефектах в транспортному електрообладнанні. В публікаціях за даним напрямком показано різні оригінальні та дієві способи зменшення термічних напружень до прийнятного рівня для нормальної і безпечної роботи термоелектричних модулів. Також, корисними при проєктуванні термоелектричних пристроїв можуть виявитись деякі роботи по судновому електрообладнанню.

В [1] в пізнавальній формі детально викладено сутність основних термоелектричних ефектів Зеєбека, Пельтьє, Томсона, роль першовідкривача термоелектрики Алессандро Вольта. З поміж іншого висвітлено про розробку академіком А.Ф. Іоффе сучасної теорії термоелектрики з використанням поняття «добротність». Також, відзначається об'єднана термоелектрична теорія, яка запропонована академіком Л.І. Анатичуком з використанням сформульованого ним закону термоелектричної індукції. Крім того, стисло описано про новітні досягнення вчених-термоелектриків.

Загальні основи теорії термоелектричних ефектів з відповідним математичним описом, а також оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів висвітлено в [2, 3, 4, 5].

Окремі розділи [6] можуть виявитись корисними при проєктуванні термоелектричних модулів з прийнятним рівнем термічних напружень. Роботи [7, 8] можуть бути використані для аналізу показників надійності суднового електрообладнання, а робота [9] при дослідженні стаціонарних теплових полів суднового електрообладнання.

Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту проведено в [10], а в [11] виконано чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. Критеріальні особливості формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання висвітлено в [12].

Застосування компенсованих комутаційних пластин в різних конструкціях термоелектричних елементів для транспортного електрообладнання проаналізовано в [13].

В [14] показано термоелектричний модуль з особливим способом контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів, в якому вплив термічних напружень значно знижується.

Мета дослідження полягає в аналізі одношарового демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Розглянемо процедуру проєктування термоелектричних модулів суднового електрообладнання (рис. 1). Після отримання технічного завдання відбувається синтез технічних об'єктів, він включає в себе вибір структури об'єкту – структурний аналіз, створення моделі і вибір його параметрів (параметричний синтез) [15]. Якщо серед варіантів структури термоелектричних модулів суднового електрообладнання шуканим є не прийнятний варіант, а найкращий, то задачу синтезу називають структурною оптимізацією. Вибір параметрів структури, оптимальних з

позиції деякого критерія при заданій структурі об'єкту, називають параметричною оптимізацією.

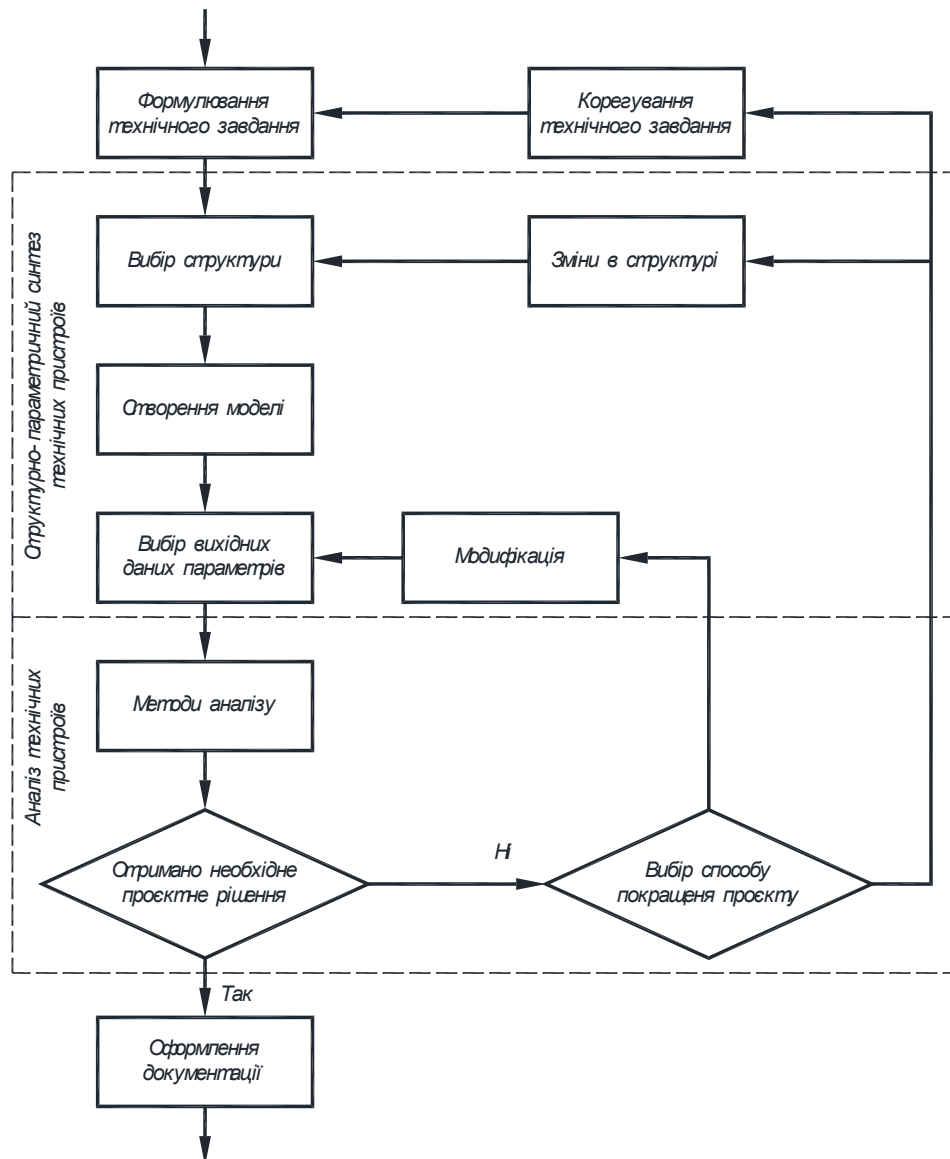


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму процедури проектування термоелектричних модулів суднового електрообладнання

Наступний етап проектування – аналіз технічних об'єктів. На цьому етапі відбувається дослідження властивостей обраної структури об'єкту проектування (його моделі) при різних внутрішніх параметрах. Результати аналізу визначають завершальний етап проектування – виготовлення технічної документації.

Фізичні процеси в термоелектричних модулях суднового електрообладнання доводиться описувати складними диференціальними рівняннями або навіть системою таких рівнянь. Зазвичай диференціальні рівняння для опису фізичних процесів включають в себе залежності не тільки від часу, а й від трьох координат у просторі, а найчастіше і від інших змінних.

Щоб отримати розв'язання таких складних завдань, застосовуються такі основні підходи:

- максимальне спрощення вихідної моделі фізичного процесу – наприклад, можна виключити залежність від часу, якщо для завдання допустимо прийняти, що вона є статичною (стаціонарною);
- поділ моделі на більш дрібні та прості моделі;
- застосування наближених чисельних алгоритмів, щоб максимально точно апроксимувати справжнє рішення.

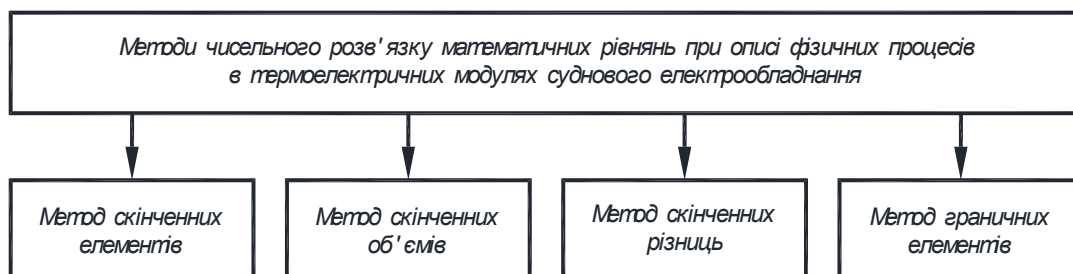


Рисунок 2 – Сучасні чисельні методи для автоматизованої роботи з математичними моделями термоелектричних модулів суднового електрообладнання

Науковці та інженери користуються багатьма чисельними методами вирішення математичних рівнянь для опису фізичних процесів [16-18], найбільш відомі з них (рис. 2): метод скінченних елементів; метод скінченних (контрольних) об'ємів; метод скінченних різниць; метод граничних елементів. Метод скінченних елементів і метод скінченних різниць стали найбільш популярними у використанні, кожен з них має свої переваги та недоліки.

Метод скінченних різниць, як і метод скінченних елементів, теж використовує дискретизацію, але вона відбувається іншим чином, з чого випливають відмінності у підходах до складання та вирішення рівнянь. Замість кінцевих елементів рішення знаходиться лише в окремих точках розрахункової області. І той, і інший метод здатні забезпечити отримання результату з достатньою з практичної точки зору точністю, тому сфера їх застосування обумовлена швидше особливостями та зручністю реалізації для конкретного класу задач. Метод скінченних різниць – це більш старий метод, ніж метод скінченних елементів, він вимагає меншої обчислювальної потужності, проте не застосовується для багатьох задач через похибки дискретизації. Метод скінченних елементів дозволяє отримати точніші результати (особливо на елементах другого порядку), але вимагає більшої обчислювальної потужності, також він більш вимогливий до якості розрахункової сітки.

Різноманіття рівнянь в часткових похідних, що описують фізичні явища, включає велику кількість окремих випадків, що не дозволяє надати їх короткий та в той же час вичерпний опис. Проте можна об'єднати більшу частину рівнянь, які широко використовуються, в три великі класи, кожен з яких описує достатньо окремий тип явища:

- рівняння еліптичного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \quad (1)$$

- рівняння параболічного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

- рівняння гіперболічного типу

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Наведені основні рівняння (1)-(3) математичної фізики використовуються при вирішенні задач різних типів. Рівняння еліптичного типу (1) широко застосовуються в задачах електротехніки, механіки та теплотехніки. Зазвичай разом з цими рівняннями використовуються граничні умови одного з наступних типів:

– граничні умови Діріхле

$$F(s) = F_0 = f_0(s); \quad (4)$$

– граничні умови Неймана

$$\frac{\partial F}{\partial n}(s) = f_0(s); \quad (5)$$

– змішані граничні умови

$$F(s) + \frac{\partial F}{\partial n}(s) = f_0(s). \quad (6)$$

Рівняння параболічного типу застосовуються в задачах дифузії і задачах електротехніки при проникненні струмів, що наводяться, в провідне тіло. Існують наступні типи граничних умов, що зустрічаються сумісно з рівняннями параболічного типу:

– граничні умови Діріхле, Неймана або змішані на границі області;

– початкові умови ($t=0$) на всій області.

Рівняння гіперболічного типу характеризують явища розповсюдження хвиль, наприклад, хвилі вібрації механічного типу або електромагнітні хвилі. Граничні умови, що пов'язані з розповсюдженням, – це умови Коші в початковий момент (задані функція та її часова похідна $\partial u / \partial t$).

Розглянемо приклад одношарового демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання, під час роботи над яким використано наведену вище блок-схему алгоритму процедури проектування. Спочатку було створено моделі термоелектричних елементів (рис. 3): класичної конструкції без демпфування (рис. 3, а), конструкції з великими демпферами (рис. 3, б) та конструкції з малими демпферами (рис. 3, в). В якості матеріалу демпферів, що представляли собою прямокутні пластини товщиною 0,5 мм, обрано електротехнічний матеріал з доброю пластичністю – свинець [19, 20]. Кожен термоелектричний елемент містив P - N -пару напівпровідників в формі паралелепіпедів $3 \times 3 \times 6$ мм. Мідні контактні комутаційні пластини геометрично представляли собою паралелепіпеди $7,5 \times 3 \times 0,5$ мм. Великі та малі свинцеві демпфери представляли собою паралелепіпеди з розмірами відповідно $7,5 \times 3 \times 0,5$ мм та $3 \times 3 \times 0,5$ мм.

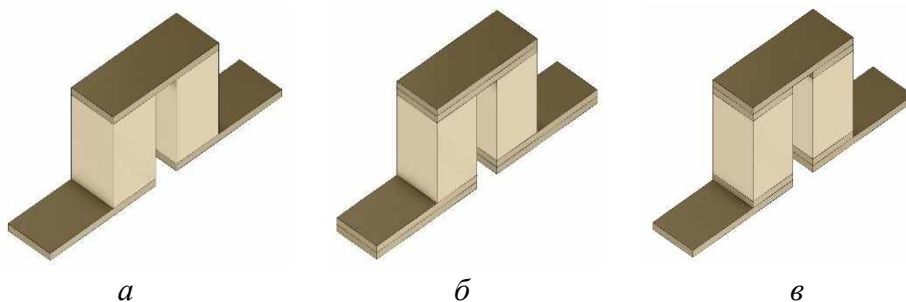


Рисунок 3 – Геометричні моделі термоелектричних елементів: класична конструкція (а); конструкція з великими демпферами (б); конструкція з малими демпферами (в)

Формування геометричних моделей термоелектричних модулів суднового електрообладнання (рис. 4, *а-в*) здійснено шляхом послідовного з'єднання відповідних моделей термоелектричних елементів (рис. 3) в ланцюг П-подібної змійки. Даний термоелектричний ланцюг містив 39 напівпровідникових термоелектричних пар з 20 напівпровідниками *P*-типу і 20 напівпровідниками *N*-типу, а також 41 мідну контактну комутаційну пластину. Термоелектричні модулі з великими та малими демпферами (рис. 4, *б, в*) додатково містили відповідно 41 та 81 демпферні вставки. Габаритні розміри (без врахування товщини ізоляційного корпусу) у спроектованих термоелектричних модулів класичної конструкції без демпфування та конструкцій з великими та малими демпферами були відповідно $30 \times 25,5 \times 7$ мм та $30 \times 25,5 \times 8$ мм.

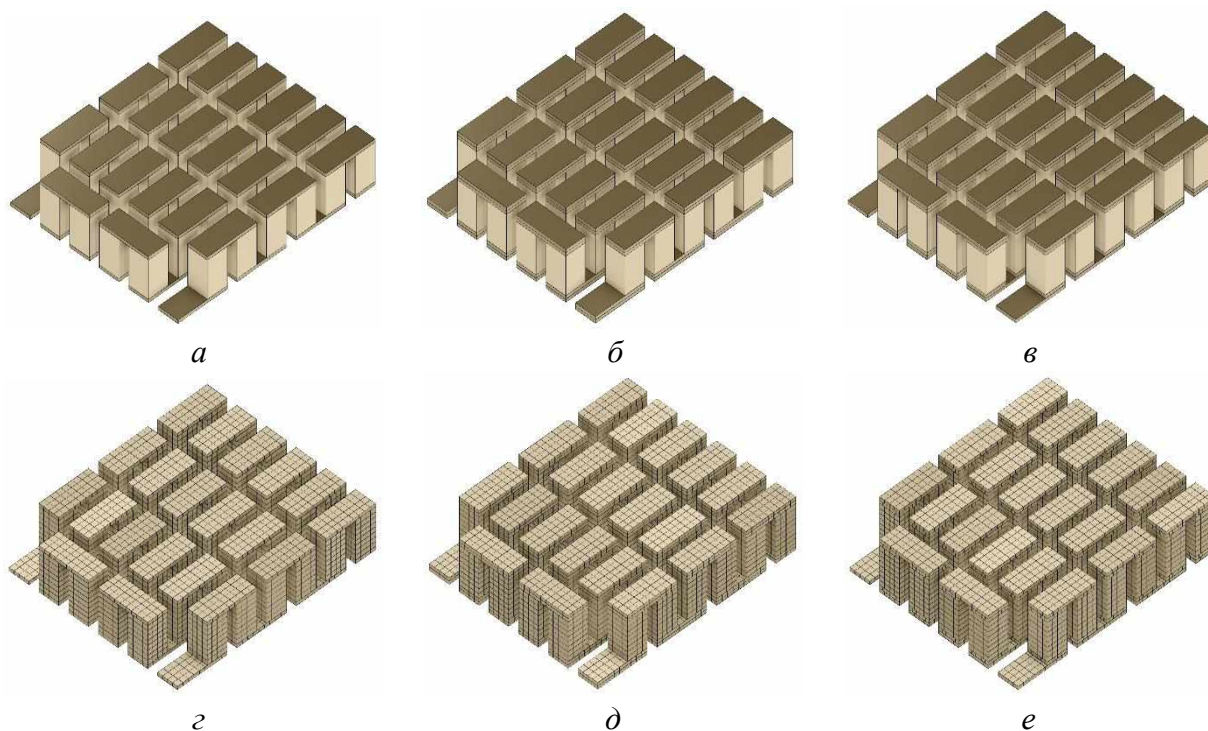


Рисунок 4 – Геометричні (*а-в*) та кінцево-елементні (*з-е*) моделі термоелектричних модулів: класична конструкція (*а, з*); конструкція з великими демпферами (*б, д*); конструкція з малими демпферами (*в, е*)

На основі сформованих геометричних моделей термоелектричних модулів суднового електрообладнання можна створити розрахункові моделі (рис. 4, *з-е*), які зручно розрахувати чисельним методом. Граничні умови при розрахунку термоелектричних модулів суднового електрообладнання можуть бути наступними: нульовий електричний потенціал $\phi_0 = 0$ В на крайній торцевій поверхні останньої в термоелектричному ланцюзі контактної комутаційної пластини; нульова температура $t_0 = 0$ °С на нижніх поверхнях нижніх (холодних) контактних комутаційних пластин; крайні торцеві поверхні першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі вважались нерухомими. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими для дослідження цих пристроїв в більш напружених режимах роботи та для оцінки впливу на них максимальних термічних напружень. Термоелектричні коефіцієнти напівпровідників *P*- та *N*-типу, ізотропні питомі електричні опори, ізотропні коефіцієнти теплопровідності, модулі пружності Юнга, коефіцієнти Пуассона та інші розрахункові коефіцієнти для однотипних електротехнічних матеріалів у всіх моделях термоелектричних модулів приймалися однаковими.

Результати розподілу основних робочих параметрів по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям суднового електрообладнання представлено

на рис. 5-7. Максимальним значенням в діапазонах розподілу робочих параметрів відповідає чорний колір (темні області моделей), середнім і мінімальним значенням робочих параметрів – відповідно сірий та білий кольори (сірі та світлі області моделей).

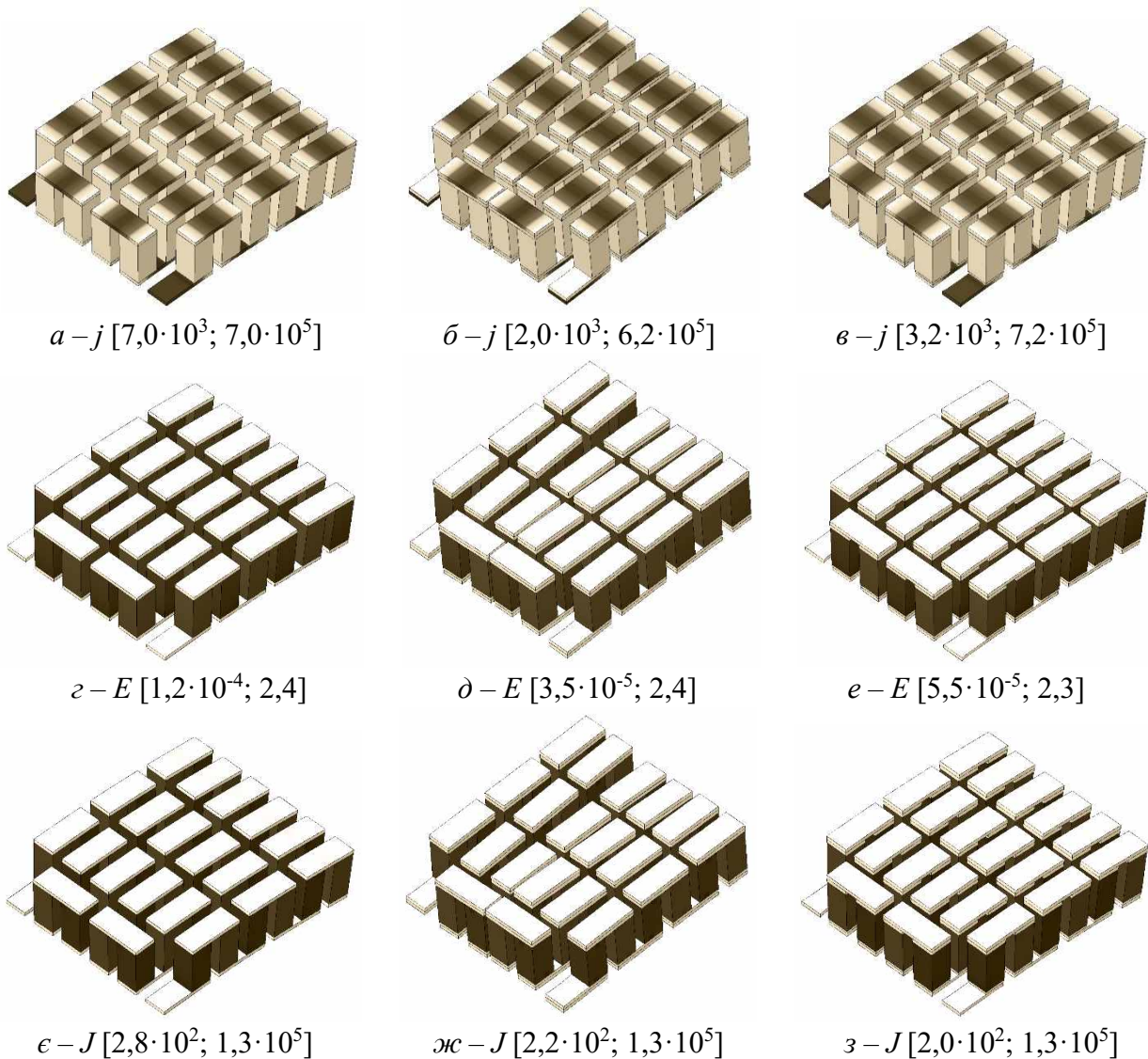


Рисунок 5 – Розподіл густини струму j [A/m²] (*a-в*), напруженості електричного поля E [В/м] (*г-е*) та омичного нагріву J [Вт/м³] (*є-з*) по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям при робочому струмі $I=1$ А: класична конструкція (*a, г, є*); конструкція з великими демпферами (*б, д, ж*); конструкція з малими демпферами (*в, е, з*)

Цілком очікувано, що максимальні значення густини струму j зосереджені в мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 5, *a-в*) через їх кращу електропровідність. Максимуми напруженості електричного поля E (рис. 5, *г-е*) та омичного нагріву J (рис. 5, *є-з*) розташовані в напівпровідникових матеріалах термоелектричних модулів. Використання демпфування не призвело до небажаного збільшення омичного тепла в загальному тепловому балансі термоелектричних модулів з великими та малими демпферами.

Температурні максимуми t зафіксовано на верхніх (гарячих) мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 6, *a-в*). При цьому для всіх розглядуваних термоелектричних модулів максимальна температура t при робочому струмі 1 А була практично однаковою та

становила приблизно 34 °С. Найбільші значення теплового потоку q зосереджені, також, в мідних контактних комутаційних пластинах (рис. 6, $z-e$).

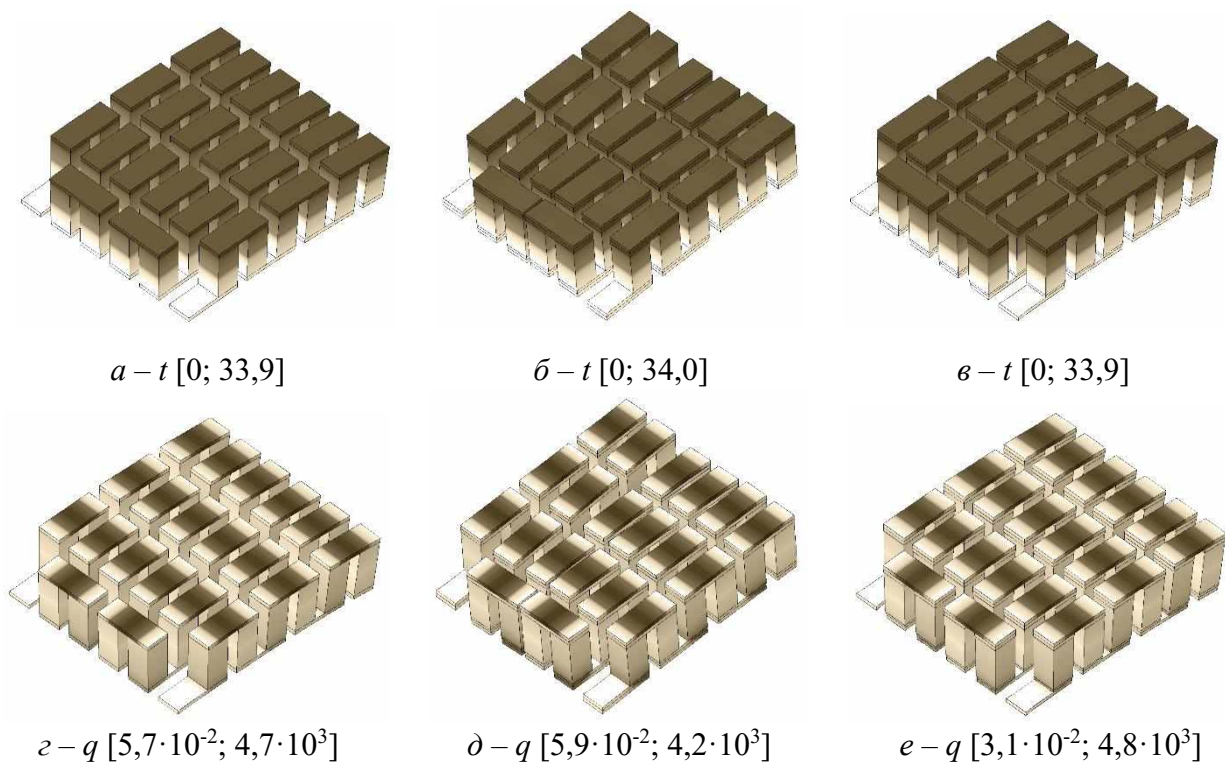
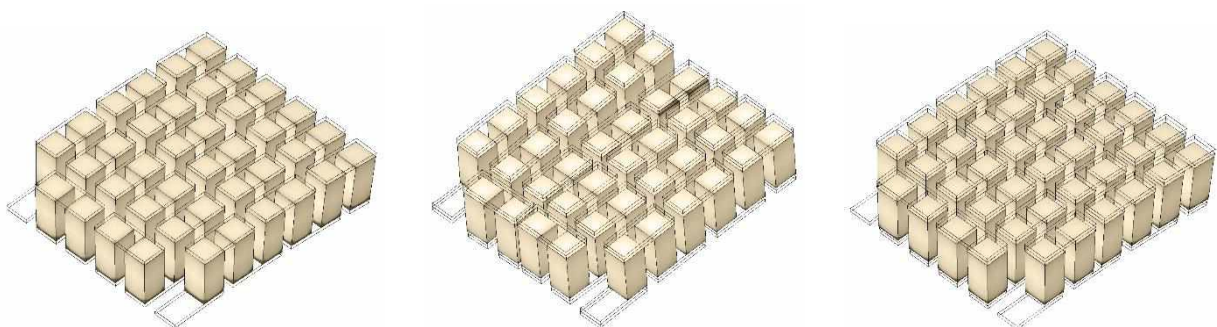


Рисунок 6 – Розподіл температури t [°C] ($a-v$) та густини теплового потоку q [Вт/м²] ($z-e$) по деформованим унаслідок термічних напружень термоелектричним модулям при робочому струмі 1 А: класична конструкція (a, z); конструкція з великими демпферами (b, d); конструкція з малими демпферами (v, e)

Окрім розподілу електричних і теплових параметрів в термоелектричних модулях суднового електрообладнання розглянуто механічні параметри – еквівалентний стрес σ та деформації ε , які використано для оцінки рівня впливу термічних напружень. Пікові значення еквівалентного стресу σ (рис. 7, $a-v$) переважно спостерігались в нижніх частинах напівпровідників, де відбувалось їх стискання внаслідок охолодження. Рівень еквівалентного стресу σ в термоелектричних модулях з демпфуванням у визначених діапазонах струмів був меншим ніж в модулі без демпфування. Зони найбільших деформацій ε в термоелектричних модулях показано на рис. 7, $z-e$. Максимальні деформації ε в термоелектричних модулях з демпфуванням у визначених діапазонах струмів були меншими ніж в класичному термоелектричному модулі без демпфування.



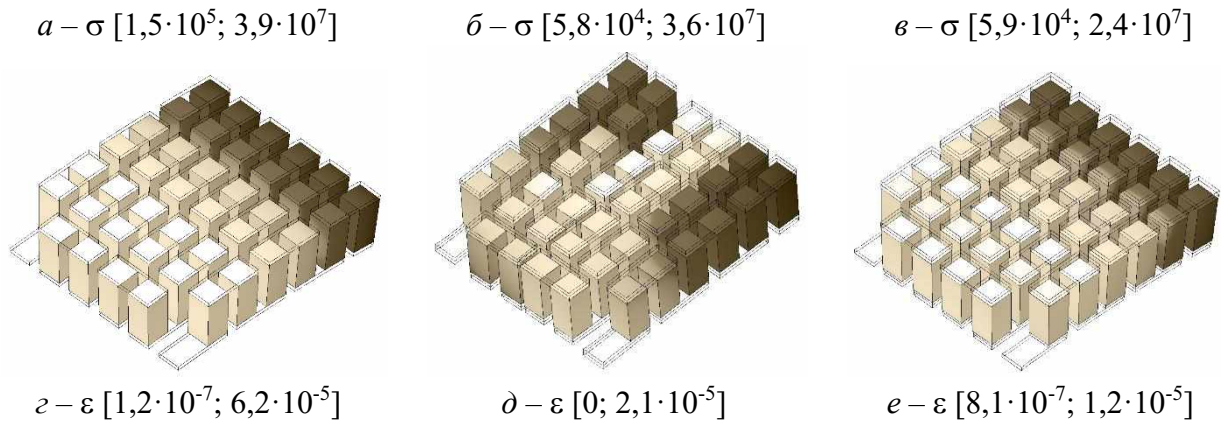


Рисунок 7 – Розподіл еквівалентного стресу σ [Па] ($a-v$) та деформацій ε [м] ($z-e$) в напівпровідниках термоелектричних модулів при робочому струмі 1 А: класична конструкція (a, z); конструкція з великими демпферами (b, d); конструкція з малими демпферами (v, e)

Таким чином, було продемонстровано зони максимального та мінімального розподілу основних робочих параметрів при робочому струмі 1 А для електричної, теплової і механічної частини розрахунку термоелектричних модулів суднового електрообладнання.

Для спроектованих термоелектричних модулів побудовано функціональні залежності $U(I)$, $E(I)$, $j(I)$, $t(I)$, $q(I)$, $J(I)$, $\sigma(I)$, $\varepsilon(I)$ для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ , деформацій ε від сили робочого струму I в діапазоні від 0 до 3 А (рис. 8-9). Криві 1-3 для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячій стороні t , густини теплового потоку q і омичного нагріву J на рис. 8 вказують на перебіг електричних і теплових процесів в термоелектричних модулях, в той час як криві 1-3 для еквівалентного стресу σ , деформацій ε на рис. 9 визначають рівень впливу термічних напружень в модулях.

Аналіз кривих 1-3 на рис. 9, a для функціональних залежностей еквівалентного стресу σ вказує на те, що перебіг механічних процесів в різних термоелектричних модулях відбувається по різному. Спільним для всіх термоелектричних модулів є наявність критичної точки при певному значенні робочого струму, після якої рівень термічних напружень починає стрімко зростати. Так, в термоелектричному модулі з класичною конструкцією без демпфування термічні напруження були приблизно на однаковому рівні до критичної точки при струмі 1,25 А. В термоелектричному модулі з великими демпферами початковий рівень термічних напружень був найбільшим і далі спадав в діапазоні від 0 до 0,5 А, після 0,5 і до 0,9 А термічні напруження залишались практично незмінними, після критичної точки 0,9 А термічні напруження стрімко зростали. Отже, термоелектричний модуль з великими демпферами мав нижчі термічні напруження ніж модуль класичної конструкції без демпфування термічних напружень лише у вузькому діапазоні струмів від 0,4 і до 1 А.

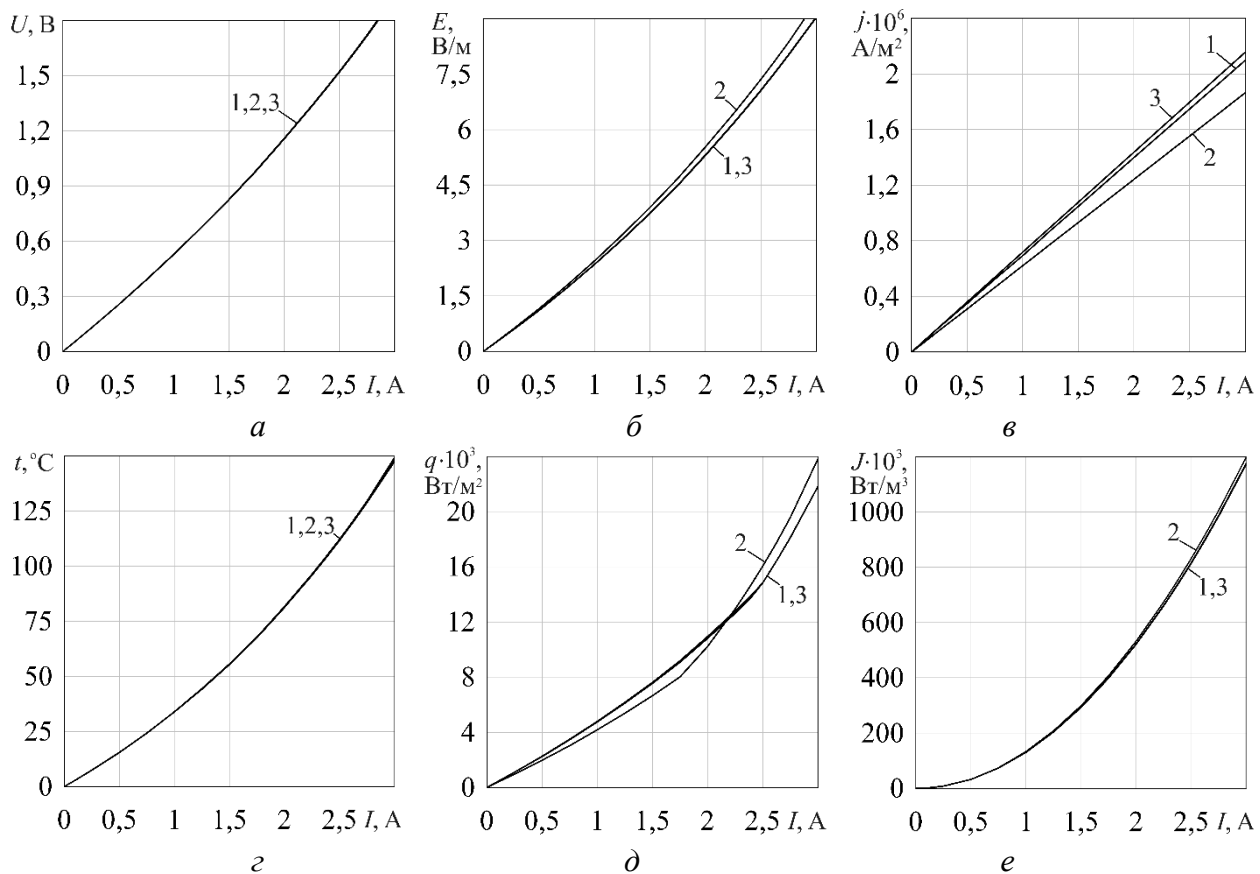


Рисунок 8 – Функціональні залежності $U(I)$, $E(I)$, $j(I)$, $t(I)$, $q(I)$, $J(I)$ напруги U (*a*), напруженості електричного поля E (*б*), густини струму j (*в*), температури на гарячій стороні t (*г*), густини теплового потоку q (*д*) і омичного нагріву J (*е*) в термоелектричних модулях від сили робочого струму I : 1 – крива для класичної конструкції; 2 – крива для конструкції з великими демпферами; 3 – крива для конструкції з малими демпферами

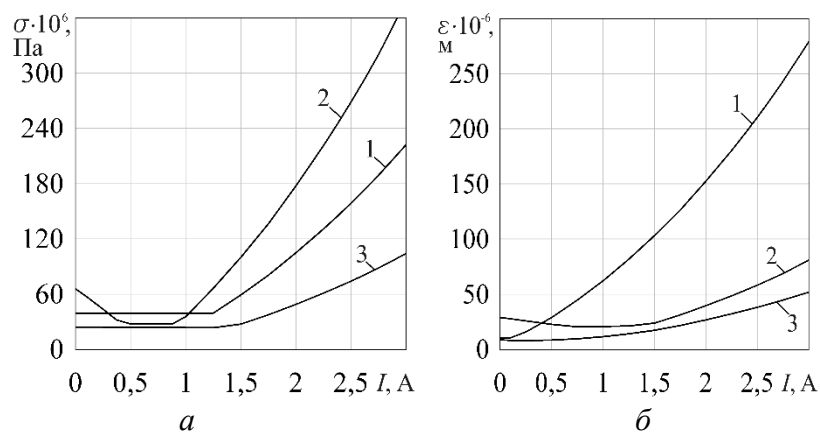


Рисунок 9 – Функціональні залежності $\sigma(I)$, $\varepsilon(I)$ еквівалентного стресу σ (*a*) та деформацій ε (*б*) в напівпровідниках термоелектричних модулів від сили робочого струму I : 1 – крива для класичної конструкції; 2 – крива для конструкції з великими демпферами; 3 – крива для конструкції з малими демпферами

Еквівалентний стрес σ та деформації ε в термоелектричному модулі з малими демпферами (крива 3 на рис. 9, *a*, *б*) були найменшими при всіх варіаціях струму в діапазоні від 0 до 3 А, що визначає цю конструкцію з демпфуванням (рис. 4, *в*) як найбільш ефективну.

Висновок. В статті проаналізовано одношарове демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях, кожен з яких містив 39 напівпровідникових *P-N*-термопар. З використанням конкретного прикладу показано вплив термічних напружень на одну модель термоелектричного модуля з класичною конструкцією без демпфування з габаритами $30 \times 25,5 \times 7$ мм та на дві різні моделі термоелектричних модулів з демпфуванням з габаритами $30 \times 25,5 \times 8$ мм. Моделі всіх зазначених модулів було сформовано на основі попередньо створених моделей відповідних термоелектричних елементів. Отриманий розподіл робочих параметрів та побудовані робочі характеристики термоелектричних модулів суднового електрообладнання для напруги U , напруженості електричного поля E , густини струму j , температури на гарячих комутаційних пластинах t , густини теплового потоку q , омичного нагріву J , еквівалентного стресу σ та деформацій ϵ при зміні робочого струму від 0 до 3 А дозволили встановити, що застосування одношарових свинцевих малих демпферних вставок суттєво зменшує рівень термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання, а ефективність термоелектричного ефекту при цьому не зменшується. Отримані результати можуть виявитись корисними для науковців і фахівців при проєктуванні та експлуатації суднового електрообладнання з термоелектричними вузлами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фреїк Д.М., Никурий Л.І., Криницький О.С. Досягнення і проблеми термоелектрики. // Фізика і хімія твердого тіла. Т. 13. № 2. 2012. С. 297-318.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество: монография. Термоэлектрические преобразователи энергии: термоэлементы. Элементная база термоэлектричества. Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. Т.2. 376 с.
3. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Черновцы: ПРУТ, 1992. 264 с.
4. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник. Киев: Наук. думка, 1979. 768 с.
5. Н. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / Н. Julian Goldsmid. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. 278 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7
6. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshch D., Hnat H. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
7. Тараненко С.В., Голубева С.М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. // Водний транспорт, 2021. № 2(33). С. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01
8. Тараненко С.В., Голубева С.М. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. // Транспортні системи і технології, 2022. №40. С. 149-158. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13
9. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубева С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. // Водний транспорт, 2021. № 3 (34). С. 13-21.
10. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2023. Т. 34 (73). № 1. С. 256-263. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39
11. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального

електроустаткування автоматичних систем. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.

12. Кириченко О.С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. // Освітологічний дискурс: наукове електронне видання. Київ. 2017. № 3-4 (18-19). С. 296-308.

13. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Приступа С.В., Голубєва С.М., Пастух О.В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. // Водний транспорт, 2023. Вип. 1 (37). С. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>

14. Кириченко О.С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2023. № 1 (277). С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>

15. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus), Kremenchuk, Ukraine, 2023, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>

16. Вислоух С.П., Волошко О.В., Тимчик Г.С., Філіпова М.В. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 228 с.

17. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.

18. Костюшко І.А., Любашенко Н.Д., Третиник В.В. Методи обчислень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2021. 243 с.

19. Леонтьєв В.О., Бевз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.

20. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. London: IntechOpen, 2019. 142 p.

REFERENCES

1. Freik, D.M., Nykuryi, L.I., & Krynytskyi, O.S. (2012). Dosiahnennia i problemy termoelektryky [Achievements and problems of thermoelectricity]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and chemistry of solids*. (Vols. 13), (pp. 297-318). [in Ukrainian].

2. Anatychuk, L.I. (2003). Termoelektrichestvo. Termoelektricheskie preobrazovateli energii: termoelementi. Elementnaya baza termoelektrichestva. [Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters: thermoelements. Elemental base of thermoelectricity.]. Chernovtsi: Institut termoelektrichestva [in Russian].

3. Anatychuk, L.I., & Semenyuk, V.A. (1992). Optimalnoe upravlenie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]. Chernivtsi: PRUT [in Russian].

4. Anatychuk, L.I. (1979). Termoelementi i termoelektricheskie ustroistva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Nauk. dumka [in Russian].

5. Julian Goldsmid, H. (2016). Introduction to Thermoelectricity. Second Edition. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010*. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7

6. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshev D., Hnat H. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1

7. Taranenko, S.V., & Golubieva, S.M. (2021). Analiz pokaznikov nadiinosti sudnovikh yelektrodivguniv, shcho vikoristovuyutsya u suchasnomu sudnovomu obladnanni [Analysis of indicators of the reliability of ship electric motors that are currently used by ships]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 2(33)), (pp. 5-12). doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01 [in Ukrainian].
8. Taranenko, S.V., & Golubieva, S.M. (2022). Vikoristannya «dereva vidmov» yak logiko-imovirnisnogo metodu analizu sudnovikh yelektrodivguniv [The development of the “tree of views” as a logical and conceptual method for analyzing ship electric motors]. *Transportni sistemi i tekhnologii – Transport systems and technologies*. (Vols. 40), (pp. 149-158). <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13> [in Ukrainian].
9. Taranenko, S.V., Kirichenko, O.S., Kolesnik, V.V., Kostyuchenko, V.I., Pristupa, S.V., Pastukh, O.V., & Golubieva S.M. (2021). Modelyuvannya statsionarnogo teplovogo polya strumoprovodnykh shin sudnovikh GRShch [Modeling of the stationary thermal field of jet-conducting tires of ship main switchboards]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 3(34)), (pp. 13-21) [in Ukrainian].
10. Kirichenko, O.S. (2023). Porivnyalnyi analiz kharakteristik termoelektrichnykh moduliv z riznimi geometrichnimi formami napivprovodnykh dlya yelektroobladnannya transportu [An up-to-date analysis of the characteristics of thermoelectric modules with different geometric shapes of conductors for electrical transport]. *Vcheni zapiski Tavriiskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 34(73)), (pp. 256-263). DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39> [in Ukrainian].
11. Kirichenko, O.S., Bilyuk, I.S., Shareiko, D.Yu., Fomenko, A.M., Gavrilov, S.O., & Bugrim, L.I. (2018). Chiselne trimirne modelyuvannya termoelektrichnogo okholodzhuvacha vimiryuvalnogo yelektrostatkuvannya avtomatichnykh sistem [Numerical trimmer modeling of thermoelectric cooler and electrical installation of automatic systems]. *Vcheni zapiski Tavriiskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo – These are notes from the Tavria National University named after V.I. Vernadsky*. (Vols. 29(68)), (pp. 58-63) [in Ukrainian].
12. Kirichenko, O.S. (2017). Kriterii formuvannya gotovnosti do profesiinoi diyalnosti inzheneriv na osnovi 3D-modelyuvannya [Criteria for determining readiness for professional activity of engineers based on 3D modeling]. *Osvitologichnii diskurs – Ostological discourse*. (Vols. 3-4(18-19)), (pp. 296-308) [in Ukrainian].
13. Taranenko, S.V., Kirichenko, O.S., Pristupa, S.V., Golubieva, S.M., & Pastukh, O.V. (2023). Termoelektrichni moduli z kompensovanimi komutatsiinimi plastinami dlya pristroiv sudnoyi yenergetiki [Thermoelectric modules with compensated switching plates for ship power systems]. *Vodnii transport – Water transport*. (Vols. 1(37)), (pp. 201-213). DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23> [in Ukrainian].
14. Kirichenko, O.S. (2023). Termoelektrichni moduli z riznimi sposobami kontaktnogo z'ednannya napivprovodnykovikh termoelementiv [Thermoelectric modules with various methods of contact connection of conductor thermoelements]. *Visnik Skhidnoukraïnskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya – Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal*. (Vols. 1(277)), (pp. 31-37). DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37> [in Ukrainian].
15. Kyrychenko, O., Golubieva, S., & Morneva, M. (2023). Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES, IEEE, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432> [in Ukrainian].
16. Visloukh, S.P., Voloshko, O.V., Timchik, G.S., & Filipova, M.V. (2021). Komp'yuterne modelyuvannya protsesiv ta sistem. Chiselni metodi [Computer modeling of processes and systems. Numerical Methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, Politekhnik [in Ukrainian].

18. Kostyushko, I.A., Lyubashenko, N.D., & Tretinik, V.V. (2021). Metodi obchislen [Calculation methods]. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, Politekhnik [in Ukrainian].
19. Leontiev, V.O., Bevz, S.V., & Vidmish, V.A. (2013). Yelektrotekhnichni materiali [Electrical materials]. Vinnitsa: VNTU [in Ukrainian].
20. Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications Edited by Saim Memon. (2019). London: IntechOpen.

S.V. Taranenko, O.S. Kyrychenko, V.V. Kolesnyk, S.V. Pristupa, S.M. Golubieva, Pastukh A.V.
DAMPING OF THERMAL STRESSES IN THERMOELECTRIC MODULES OF SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT

The research is related to the urgent issues of reducing to an acceptable level thermal stresses in the thermoelectric modules of the ship's electrical equipment. Thermal stresses arise in them due to thermal deformations in thermoelectric materials as a result of their simultaneous expansion and contraction during the thermoelectric effect. Based on the three created models of thermoelectric elements by connecting them into a thermoelectric circuit in the form of a U-shaped snake, three models of the corresponding thermoelectric modules were formed. One module had a classic design without damping, and the other two had single-layer damping inserts made of ductile material. Each of these thermoelectric modules consisted of a thermoelectric chain of 39 semiconductor P-N-thermocouples, contained 20 P-type semiconductors and 20 N-type semiconductors, 41 contact commutation plates. The overall dimensions (excluding the thickness of the insulating case) of the designed thermoelectric modules of the classic design without damping and designs with large and small dampers were $30 \times 25.5 \times 7$ mm and $30 \times 25.5 \times 8$ mm, respectively. The outer surfaces of the thermoelectric modules were considered adiabatically heat-insulated for the study of these devices in more stressful modes of operation and for evaluating the influence of maximum thermal stresses on them. According to the results of the calculation, the distribution of the main operating parameters by volume of thermoelectric modules was obtained. The operating characteristics of the thermoelectric modules of the ship's electrical equipment at variations of the operating current from 0 to 3 A for current density j , voltage U , electric field strength E , temperature on the hot side t , heat flux density q , ohmic heating J , equivalent stress σ and deformations ε . Based on the obtained results, the best design of the thermoelectric module was chosen, in which the damper inserts effectively reduce the level of thermal stresses. The advantages of using modern numerical calculation methods for solving field problems in the design of ship electrical equipment are shown.

Keywords: thermoelectric modules, design, numerical methods, thermoelectric effect, thermal stresses, one-layer damping, ship electrical equipment.

Сорока В.В., Гороховська О.К.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ СИГНАЛІВ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ДО ПОРОГОВИХ ЗНАЧЕНЬ

Метою статті є проведення апробації розроблених методів, що входять до складу комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Поставлена мета досягається шляхом глибокого аналізу теоретичних основ проведення вібродіагностики об'єктів контролю, викладених у сучасних джерелах інформації, а також безпосереднього застосування розроблених теоретичних методів для проведення комплексної вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Доведено, що найпростішим є аналіз загальних рівнів стандартних частотних смуг при визначенні вібраційного стану обладнання. При цьому загальні рівні стандартних частотних смуг порівнюються з пороговими значеннями, встановленими для різних типів машин. Підкреслюється тісний зв'язок цих значень зі значеннями меж, наведених у додатках стандартів для відповідних типів обладнання та отриманих у ході експлуатації. У процесі моніторингу загального технічного стану головної енергетичної установки засобів водного транспорту найчастіше використовують набір октавних та третьоктавних фільтрів з постійною відносною шириною, які формують широкопasmовий спектр. Під час аналізу спектрів дольоктавних діапазонів здійснюється порівняння рівня кожної смуги з пороговими значеннями, що вимагає додаткових обробок. Найбільш суттєвим результатом дослідження є встановлення факту, що розроблений метод дозволяє виявляти зміну стану або в аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний підхід. Підтверджено, що особливо ефективний результат отримано для сигналів без перехідних процесів та для високих швидкостей деградації, які перевищують швидкості максимальних за рівнем флуктуацій, що є важливим при оперативному контролі з метою управління відповідальним обладнанням. Запропонований спосіб побудови порогів дозволяє підвищити швидкість реакції на зростання, пов'язану з прискореною деградацією. При цьому доведено перевагу апроксимації на інтервалі, що відповідає останній тенденції.

Ключові слова: сигнал, вібродіагностика, поріг, головна енергетична установка, фільтр, флуктуація

Актуальність дослідження. Контроль технічного стану роторного обладнання головної енергетичної установки засобів водного транспорту під час експлуатації [1, 2] свідчить про переваги вібраційного методу. Вібрація, що розповсюджується від місця виникнення до точки вимірювання, характеризує зміни властивостей об'єкта, які можуть розглядатися як причина або індикатор глибиною діагнозу появи дефектів.

Типи оцінки змін вібросигналів (віброконтроль, вібромоніторинг, вібродіагностика) застосовують різні методи аналізу по мірі ускладнення об'єкта діагностики та зростання глибини діагнозу [3-5].

Для оцінки зміни технічного стану об'єкта контролю суттєве значення має відхилення вібраційної активності від нормальної, що відповідає бездефектному стану [6]. Для оцінки таких відхилень необхідно підвищити якість та обсяг діагностичної інформації, що потребує удосконалення основних методів аналізу вібраційного сигналу та автоматичної обробки вібраційних сигналів.

Найпростішим для інтерпретації є аналіз загальних рівнів стандартних частотних смуг [7], використовуваних для визначення вібраційного стану. Тому вони порівнюються з пороговими

значеннями, які встановлюються в залежності від типу машин, спираючись на значення меж, наведених у додатках стандартів для відповідних типів обладнання, та досвіду експлуатації.

Отже, питання практичного застосування методу автоматичної адаптації сигналів вібродіагностики до порогових значень залишається актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень. Робота конкретного агрегату може супроводжуватися певними явищами, кожне з яких характеризується діапазоном зміни фактору, що впливає на вібрацію [8]. При аналізі вібраційних параметрів під час природних перехідних процесів виділяються й обробляються дані перехідних процесів змін, зв'язаних з деградацією технічного стану обладнання. Традиційно для побудови порогових значень параметрів використовуються базові значення як середні з оцінкою розкиду значень у стабільному режимі роботи об'єкта, використовуючи дані з кількох послідовних вимірювань [9].

Також рекомендується визначати різні базові значення контролю у різних режимах. Однак на практиці ця вимога є складною, тому виділяють обмежену кількість режимів, як правило, за частотою, навантаженням (споживаним струмом) або іншим найбільш значущим для віброактивності об'єкта параметром. При цьому як базове значення для кожного режиму встановлюється середнє, а пороги враховують максимальний розкид за час спостереження, що охоплює найтриваліші монотонні різноспрямовані зміни [10].

Якщо за час спостереження виявляється лише одна тенденція і є ознаки конкретних дефектів, це інтерпретується як деградація. Такий спосіб можна назвати стандартним, оскільки він є найбільш застосовним на практиці [11-13]. При цьому навіть у межах одного виділеного режиму можуть бути суттєві флуктуації віброактивності через зміни різних факторів.

Для моніторингу загального технічного стану найчастіше використовують набір октавних та третьоктавних фільтрів з постійною відносною шириною, формуючи широкосмуговий спектр.

Аналіз спектрів дольоктавних діапазонів полягає у порівнянні рівня кожної смуги з пороговими значеннями і вимагає додаткових обробок [14]. Зазначені особливості дольоктавних спектрів роблять їх одним з основних інструментів для більш детальної оцінки технічного стану. Дольоктавні спектри, як і стандартні загальні рівні, обчислюються відомими способами смугової фільтрації, які можуть здійснюватися як у часовій області за допомогою згортки, так і в частотній області за допомогою накладання на спектри потужності вагових вікон. Однак широкосмугові види аналізу не дозволяють визначити природу компонентів, що викликають зміну віброактивності [15].

Мета дослідження. Проведення апробації розроблених методів, що входять до складу комплексного методу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Перевірка ефективності методу побудови порогів, як частини методу адаптації порогових значень автор у своїх дослідженнях проводив способом математичного моделювання перехідних процесів у вібраційному сигналі. Цей спосіб дає можливість розглянути широкий перелік можливих ситуацій, включивши моделі, які якісно відповідають часовим трендам, отриманим на реальному судновому та промисловому обладнанні.

З позиції вібраційного моніторингу ключовою відмінністю змін параметрів вібрації, пов'язаних з природними перехідними процесами, від змін, пов'язаних з деградацією технічного стану, є те, що величини природних факторів, а, відповідно, і вібраційні параметри, змінюються в деяких типових межах. Для кожного впливу фактори порогів та дані зміни найчастіше носять циклічний характер.

Так, добові зміни температури повітря для певного приміщення або місцевості рідко перевищують 5-10°, так само, як і діапазон зміни навантаження в межах виділеного режиму змінюється у певних межах та залежить від технологічного процесу. Особливістю природних перехідних процесів також є те, що закони їх зміни можуть бути зовсім різними і часто хаотичними, коли зміни, викликані деградацією більшості випадків, є монотонними та близькими до експоненційного закону.

Для апробації методу адаптації порогових значень за допомогою модельних сигналів у середовищі Mathcad розроблено генератор сигналів перехідних процесів, в якому визначається загальна тривалість сигналу в секундах T_{full} , середнє значення вібраційного параметра M (рис. 1).

Крім цього, задаються параметри декількох сукупностей перехідних процесів. Кожна сукупність є послідовністю різноспрямованих перехідних процесів, що характеризуються середнім інтервалом зміни параметра ($M \pm \bar{L}$) та середнім часом, за який відбувається одна ітерація перехідного процесу. Кожна сукупність є моделлю впливу певного фактору на параметр вібрації.

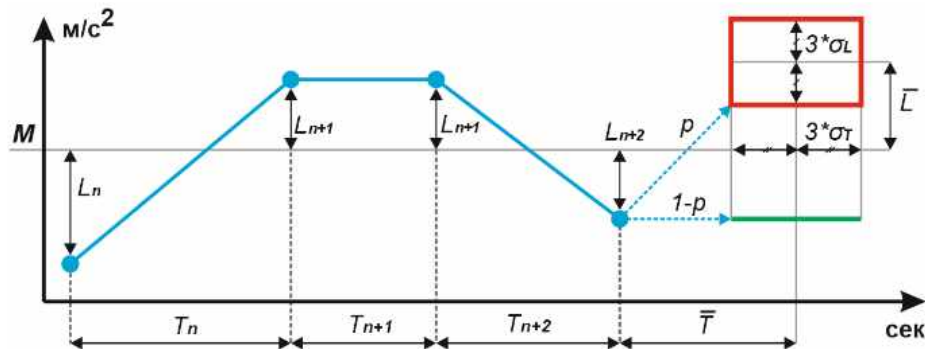


Рис. 1 – Розрахунок граничних точок сукупності тенденцій (розроблено автором)

За заданими параметрами для кожної сукупності розраховуються граничні точки послідовності тенденцій. При цьому кожна наступна точка з ймовірністю p може бути побудована з урахуванням наявності перехідного процесу, спрямованого протилежно попередньому, або з ймовірністю $(1-p)$ перехідний процес може бути відсутнім, при цьому гранична точка вибирається на рівні попередньої точки.

Точки будуються так, що їх відстані один від одного по осі часу відповідають нормальному розподілу із середнім $\bar{T}$ та СКВ δ_T , а відхилення точок від середнього значення M по осі значень параметра відповідає нормальному розподілу із середнім значенням $\bar{L}$ та СКВ δ_L .

За згенерованими точками відбувається інтерполяція проміжних точок з кроком часу dT_0 за допомогою кубічної сплайн-інтерполяції, в результаті чого для кожної сукупності перехідних процесів розраховується відповідний сигнал. Далі сигнали підсумовуються між собою та сигналом випадкових флуктуацій, відповідних нормальному закону розподілу із заданим СКВ σ_s , який характеризує природний випадковий розкид параметра.

Для імітації деградації стану можна задати експоненційне зростання з постійної τ із заданого часу T_0 . Швидкість деградації цього зростання порівнювалася зі швидкістю перехідних процесів шляхом оцінки відповідних постійних τ_0 часу. Для групи перехідних процесів τ_n оцінювалася як постійна часу експоненційного зростання від точки $(0; M - \bar{L})$ до точки $(\bar{T}; M + \bar{L})$:

$$\tau_n = \bar{T} \ln \left(\frac{M + \bar{L}}{M - \bar{L}} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Під час апробації запропонованого методу за допомогою генератора перехідних процесів був сформований широкий перелік модельних сигналів (більше 100) з різним числом сукупностей перехідних процесів (до трьох) і параметрами перехідних процесів. Для кожного такого сигналу наприкінці задавалося зростання різної постійної часу.

Результати розробленого методу адаптації порогових значень (апробований метод) порівнювалися зі стандартним методом розрахунку порога (контрольний метод), який можна сформулювати так. Як базове значення використовується середнє, поріг встановлюється на

рівень 3 СКВ від базового значення, при цьому середнє значення та СКВ визначаються за тривалий час спостереження, що включає всі можливі перехідні процеси (розглядався відрізок часу з початку спостереження до початку деградації).

Для контрольного методу та першого накопичувача апробованого методу (до якого потрапляють вихідні дані) застосовувався метод трьох збігів для виключення перевищень порога випадковим викидам у сигналі, тобто факт перевищення фіксувався за наявності трьох перевищень поспіль.

У результаті обробки широкого переліку модельних сигналів підібрано три типових ситуацій, що характеризуються певним якісним результатом порівняння апробованого та контрольного методу. Аналіз сигналів, відповідних даним типовим сигналам, наводиться нижче.

Апробація методу на типових сигналах

Типовий сигнал №1.

Особливості сигналу: перехідних процесів немає або рівень їх флуктуацій нижче за рівень випадкових. Як приклад сигналу з наведеними особливостями розглянуто сигнал з нормальним розподілом з $M=10 \text{ м/с}^2$, $\sigma_s=0,5 \text{ м/с}^2$ та зростанням з постійною $\tau_0 = 4$ години з початком в $T_0=20\,000 \text{ с}$. За допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $T_k = 201\,349 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $T_a = 200\,383 \text{ с}$, тобто приблизно 3 разу (на 71%) раніше від початку деградації (рис. 2).

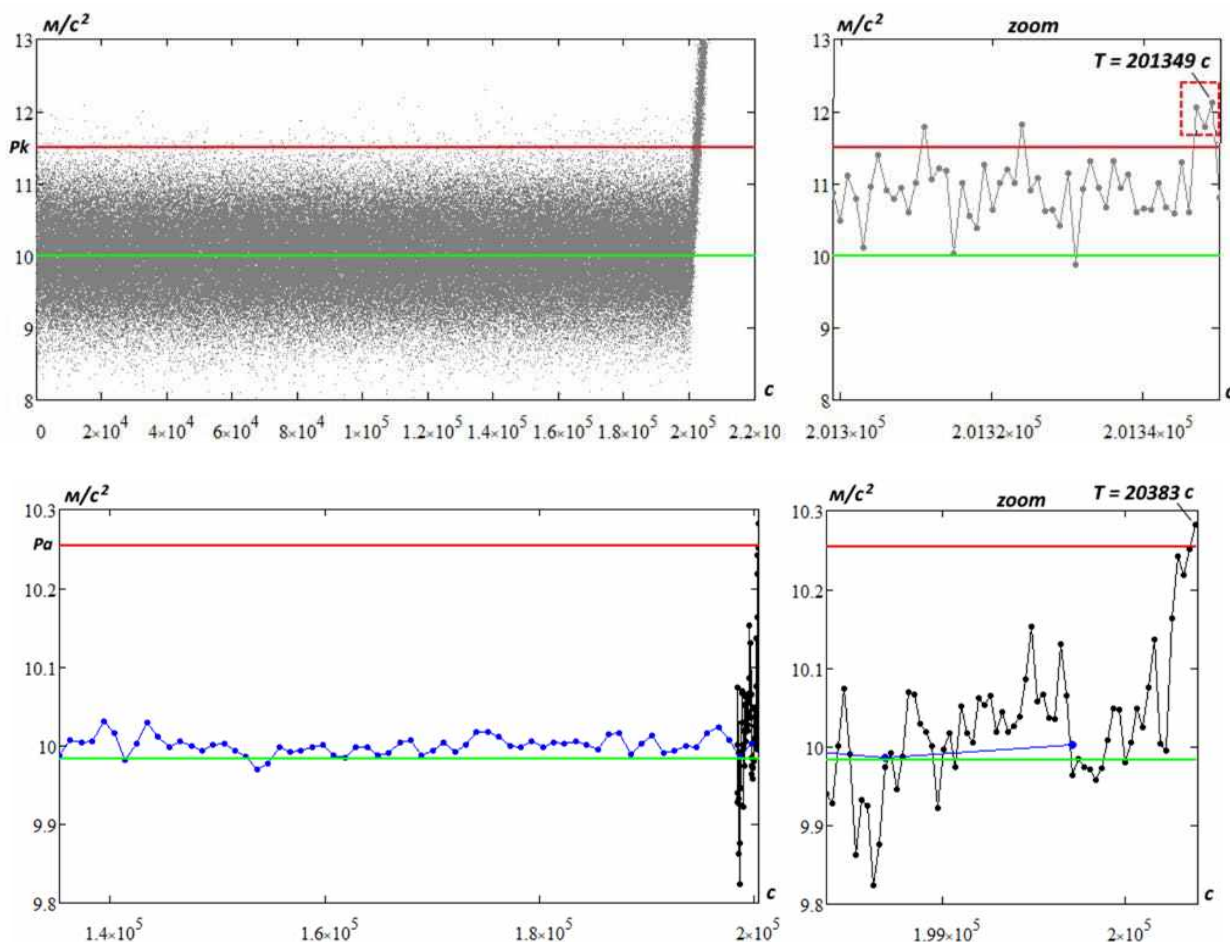


Рис. 2 – Обробка сигналу з нормальним законом розподілу: контрольний (згори) та апробований (знизу) метод (розроблено автором)

За результатами аналізу результатів обробки сигналів з подібними якісними особливостями встановлено, що за допомогою запропонованого методу небезпечний стан

виявляється значно раніше в залежності від характеру сигналу (рівня розкиду) та швидкості деградації. Це пов'язано з тим, що в усередненні випадкових флуктуацій розкид зменшується приблизно на порядок від накопичувача до накопичувача, що зумовлює збільшення точності виявлення зростання лише на рівні зниженого розкиду.

Подібна тенденція (відсутність значних перехідних процесів) спостерігається в сигналах обладнання при роботі в одному температурному режимі та з одним навантаженням без істотного впливу інших факторів і характерна більше для промислових умов, ніж суднових.

Типовий сигнал №2.

Особливість сигналу: швидкість деградації можна порівняти або вона є нижче швидкості перехідного процесу з найбільшим інтервалом флуктуацій, рівень яких перевищує рівень випадкового розкиду. Як приклад сигналу з наведеними особливостями розглянуто сигнал з такими параметрами генерації: $M = 10 \text{ м/с}^2$, $\sigma_s = 0,25 \text{ м/с}^2$; перша сукупність перехідних процесів: $\bar{L} = 1 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0,5 * \bar{L}$, $\bar{T} = 256 \text{ с}$, $\sigma_T = 0,1 * \bar{T}$; друга сукупність перехідних процесів: $\bar{L} = 0,5 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0,5 * \bar{L}$, $\bar{T} = 8192 \text{ с}$, $\sigma_T = 0,1 * \bar{T}$, деградація: $\tau d = 1 \text{ год}$, $Td = 20\,000 \text{ с}$.

У цьому сигналі швидкість деградації нижче середньої швидкості зміни першої сукупності перехідних процесів ($1/\tau d < 1/\tau_n$) з максимальним інтервалом змін. У ході обробки даного сигналу за допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $Tk = 201\,322 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $Ta = 201\,297$, тобто на 25 с раніше (рис. 3, 4), позначення такі самі, як на рисунках 4.14, 4.15. Дане значення часу становить близько 0,4% від постійного часу деградації, що є несуттєвою різницею.

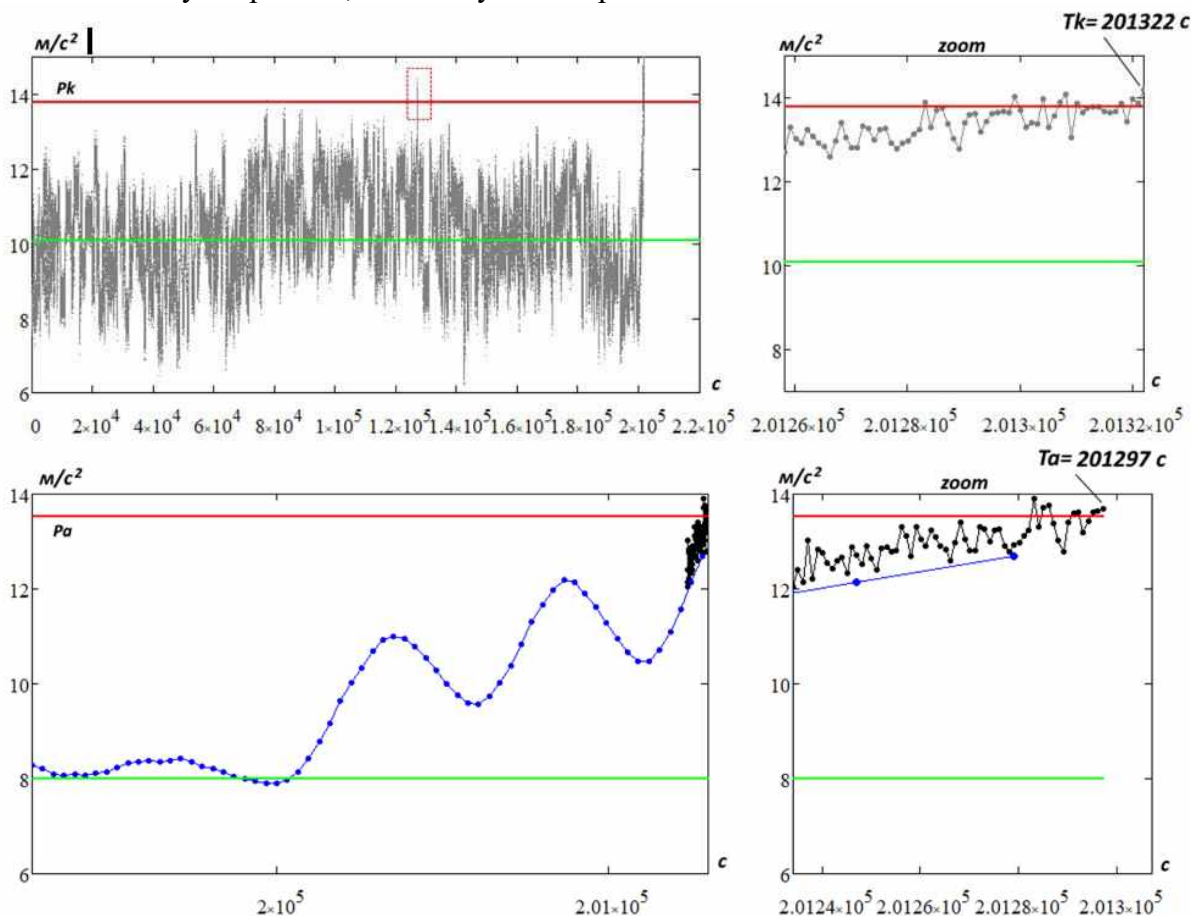


Рис. 3 – Обробка сигналу зі швидкістю деградації меншої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: контрольний (згори) та апробований (знизу) метод
(розроблено автором)

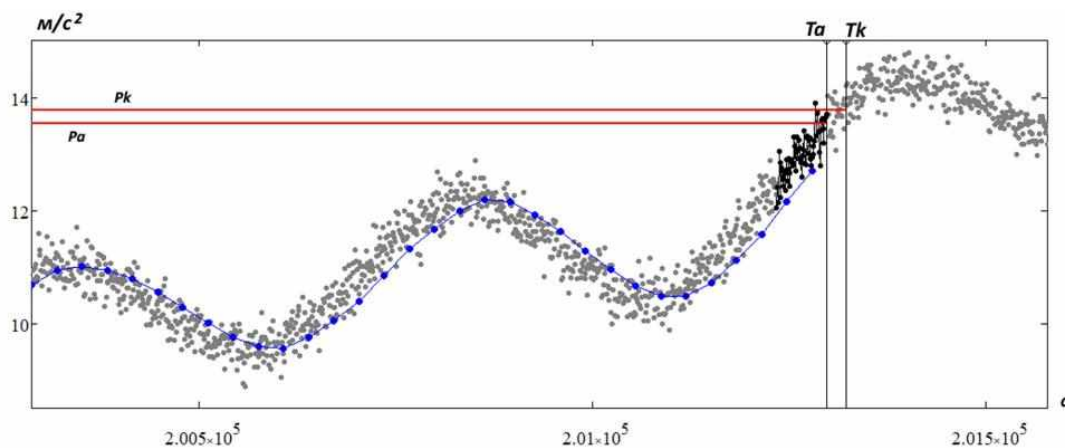


Рисунок 4 – Обробка сигналу зі швидкістю деградації меншою швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: порівняння контрольного та апробованого методів
(розроблено автором)

Аналіз результатів обробки сигналів з такими якісними особливостями показав, що за допомогою запропонованого методу зміна стану виявляється приблизно в той же час, що і за допомогою контрольного. При ще нижчих швидкостях деградації спостерігається несуттєве запізнення методу, що апробується, порівняно з контрольним (до 2% τ_d), що пояснюється затримкою (зміщенням) сигналу при його усередненні (згладжуванні).

Типовий сигнал № 3.

Особливості сигналу: швидкість деградації значно перевищує швидкість перехідного процесу з найбільшим інтервалом флуктуацій, причому рівень випадкового розкиду менше заданих монотонних флуктуацій.

Розглянемо сигнал, з такими параметрами:

$M = 10 \text{ м/с}^2$, $\sigma_s = 0.25 \text{ м/с}^2$;

перша сукупність перехідних процесів:

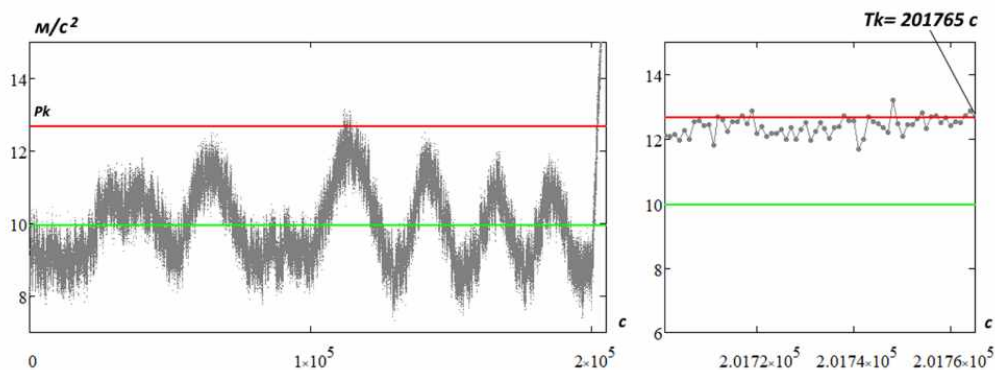
$\bar{L} = 0.25 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0.5 \bar{L}$, $\bar{T} = 256 \text{ с}$, $\sigma_T = 0.1 * \bar{T}$;

друга сукупність перехідних процесів:

$\bar{L} = 1 \text{ м/с}^2$, $\sigma_L = 0.5 * \bar{L}$, $\bar{T} = 8192 \text{ с}$, $\sigma_T = 0.1 * \bar{T}$

деградація: $\tau_d = 2 \text{ год}$, $T_d = 20000 \text{ с}$.

У цьому сигналі швидкість деградації значно перевищує середню швидкість перехідних процесів ($1/\tau_d > 1/\tau_n$) з максимальним інтервалом флуктуацій (№2). При обробці даного сигналу за допомогою контрольного методу перевищення було виявлено в момент часу $T_k = 201765 \text{ с}$, а за допомогою апробованого $T_a = 200756$, тобто на 16 хвилин раніше (рис. 5, 6), позначення такі самі, як на рис. 4.16, 4.17. Ці значення становить близько 13% від постійної часу деградації та відповідає скороченню часу виявлення зміни стану з початку деградації більш ніж у 2 рази (на 57%).



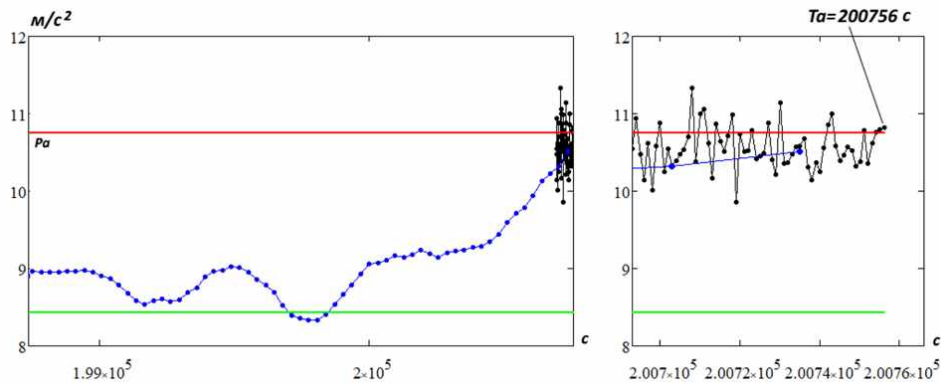


Рис. 5 – Визначення зміни стану на сигналі зі швидкістю деградації більшої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: контрольний (згори) та апробований (знизу) метод (розроблено автором)

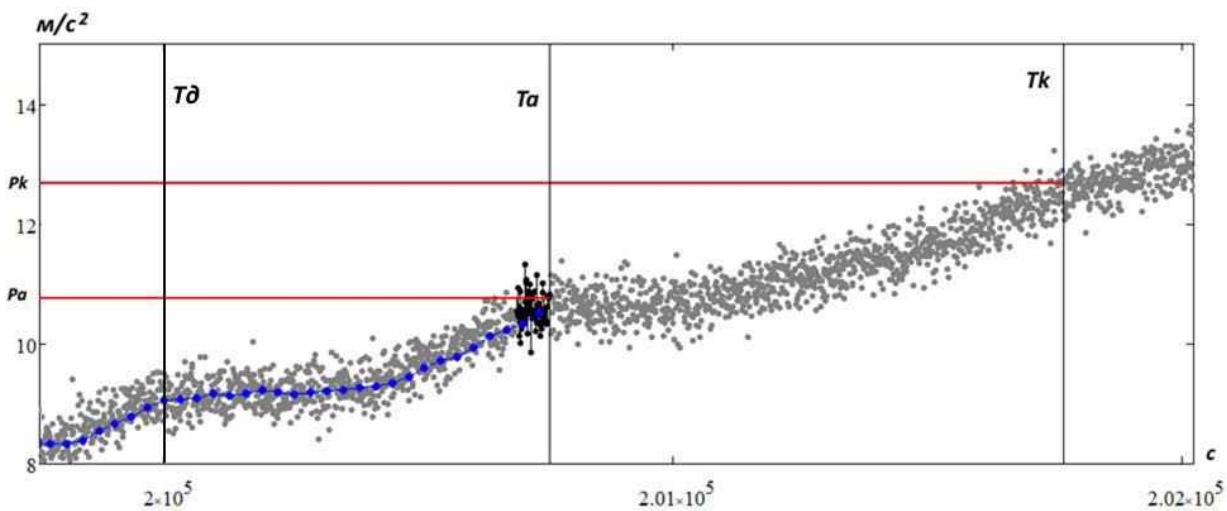


Рис. 6 – Визначення зміни стану на сигналі зі швидкістю деградації більшої швидкості типового перехідного процесу з максимальним інтервалом флуктуацій: порівняння контрольного та апробованого методів (розроблено автором)

При обробці сигналів з подібними якісними особливостями встановлено, що за допомогою розробленого методу небезпечний стан виявляється раніше залежно від різних умов – швидкості деградації, співвідношення інтервалів змін перехідних процесів та рівня випадкових флуктуацій.

При швидкості деградації, що істотно перевищує середню швидкість перехідних процесів з максимальним інтервалом зміни, що значимо перевищує рівень природного розкиду, запропонований метод дозволяє підвищити швидкість реакції на зміну стану більш ніж у 2 рази, що є суттєвим результатом, який дозволяє заздалегідь прийняти управлінські рішення для запобігання аварійно небезпечним.

Висновки. У ході порівняння стандартного та розробленого методу встановлено, що розроблений метод дозволяє виявляти зміну стану або в аналогічний момент часу або раніше, ніж стандартний підхід. Особливо ефективний результат отримано для сигналів без перехідних процесів та для високих швидкостей деградації, які перевищують швидкості максимальних за рівнем флуктуацій, що є важливим при оперативному контролі з метою управління відповідальним обладнанням. Ефективність запропонованого методу автоматичної адаптації порогових значень підтверджена, оскільки запропонований спосіб побудови порогів дозволяє істотно підвищити швидкість реакції на зростання, пов'язану з прискореною деградацією, а

спосіб прогнозування дає кращий результат, ніж аналогічні способи. При цьому доведено перевагу апроксимації на інтервалі, що відповідає останній тенденції. Крім зазначених результатів, метод довів ефективність при тестуванні в натурних умовах та експлуатації на реальних об'єктах систем із впровадженими запропонованих рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mitchell, J.S. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance. Seventy Years of Continuous Progress / J.S. Mitchell // *Sound & vibration*. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 62-78.
2. Shahsavari R., Ulm F.-J. Indentation analysis of fractional viscoelastic solids. *Journal of mechanics of materials and structures*. 2009. Vol. 4, No. 3. P. 523–550.
3. Міхалков С.В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/ Українська державна академія залізничного транспорту. – Харків: 2007 – 20 с.
4. Чепурний Ю.В. Експериментальне дослідження віброакустичним методом клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / Ю.В. Чепурний, К.Г. Яценко, М.О. Блещенко, Г.Л. Коростильов // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2020. – № 1(61). – С. 177-182.
5. Chepurnyi Y.V. The Method of Controlling the Valve Mechanism of the Engine for Exhaust Pulsation Study / Y.V. Chepurnyi, O.M. Leonenko // *International Journal on Emerging Technologies*. – 2020. – № 11(3). – P. 91- 95.
6. Wenske W. Zur Ableitung der dynamischen Kennlinie des Asynchronmotors in Hinblick auf die Berechnung von Schwingungserscheinungen in Antriebsanlagen. // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule O. Guericke*. – Magdeburg. – 1970. – jg.14. – Heft 5/6.– S. 517–523.
7. Deery, J. The 'Real' History of Real-Time Spectrum Analyzers. A 50-Year Trip Down Memory Lane / Joe Deery // *Sound & vibration*. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 54-59.
8. Marynowski K., Kapitaniak T. Kelvin-Voigt versus Bürgers internal damping in modeling of axially moving viscoelastic web. *International Journal of NonLinear Mechanics*. 2002. 37. P. 1147–1161.
9. Сараєва, І.Ю. Удосконалення процесу діагностування циліндро-поршневої групи та герметичності клапанів бензинового двигуна автомобіля [Текст]: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.22.20 / І.Ю. Сараєва. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2006. – 23 с.
10. Водка А.А. Виброизмерительный комплекс на основе микроэлектромеханического сенсора / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля*. – Луганськ, 2012.– № 9 (180). Ч.1. – С. 140-147.
11. Зебров В.В. Анализ конструкций виброизолирующих опор металлорежущих станков / В.В. Зебров, Т.С. Балакина, Е.А. Владецкая // *Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., асп. и мол. учёных, г. Севастополь, 12-16 мая 2008г.- г. Севастополь: Изд-во Сев НТУ, 2008.- С. 124-125.*
12. Резник Д. О., Поліщук І. А. Система вібродіагностики, прогнозування відмов та оцінки стану турбогенератора. *Молодий вчений*. 2019. № 11 (75). С. 694–697.
13. Чепурний Ю.В. Експериментальне дослідження віброакустичним методом клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання / Ю.В. Чепурний, К.Г. Яценко, М.О. Блещенко, Г.Л. Коростильов // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2020. – № 1(61). – С. 177-182.
14. N.S.Ahirroo, Dr.S.P.Bhosle, Dr.D.V.Nehete // *Dynamics and Vibration Measurements in Engines// 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering*, 2018.
15. Renaud F., Dion J.-L., Chevallier G., Tawfiq I., Lemaire R. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier. 2011. 25. P. 991–1010.

REFERENCES

1. Mitchell, J.S. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance. Seventy Years of Continuous Progress / J.S. Mitchell // *Sound & vibration*. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 62-78.
2. Shahsavari R., Ulm F.-J. Indentation analysis of fractional viscoelastic solids. *Journal of mechanics of materials and structures*. 2009. Vol. 4, No. 3. P. 523–550.
3. Mikhalkov S.V. Improvement of the technology of diagnosing the rolling bearings of electric engines of diesel locomotives by vibration characteristics. *Udoskonalennya tekhnolohiyi diahnostuvannya pidshypnykiv kochennya elektrychnykh dvyhuniv teplovoziv za vibratsiynymy kharakterystykamy*. Autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.22.07/ Ukrainian State Academy of Railway Transport. - Kharkiv: 2007 - 20 p.
5. Chepurnyi Y.V. The Method of Controlling the Valve Mechanism of the Engine for Exhaust Pulsation Study / Y.V. Chepurnyi, O.M. Leonenko // *Internation Journal on Emerging Technologies*. – 2020. – № 11(3). – P. 91- 95.
6. Wenske W. Zur Ableitung der dynamischen Kennlinie des Asynchronmotors in Hinblick auf die Berechnung von Schwingungserscheinungen in Autriebsanlagen. // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule O. Guericke. – Magdeburg. – 1970. – jg.14. – Heft 5/6. – P. 517–523*.
7. Deery, J. The ‘Real’ History of Real-Time Spectrum Analyzers. A 50-Year Trip Down Memory Lane / Joe Deery // *Sound & vibration*. – 2007. – Vol. 41(1). – P. 54-59.
8. Marynowski K., Kapitaniak T. Kelvin-Voigt versus Bürgers internal damping in modeling of axially moving viscoelastic web. *International Journal of NonLinear Mechanics*. 2002. 37. P. 1147–1161.
9. Sarayeva, I.Yu. Improvement of the process of diagnosing the cylinder-piston group and the tightness of the valves of the gasoline engine of the car. *Udoskonalennya protsesu diahnostuvannya tsylindro-porshnevoyi hrupy ta hermetychnosti klapany benzynovoho dyvhuna avtomobilya* [Text]: autoref. thesis... candidate technical Sciences: 05.22.20 / I.Yu. Sarajevo. – Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Road University, 2006. – 23 p.
10. Vodka A.A. Vibration measuring complex based on a microelectromechanical sensor. *Vybroyzmytel'nyy kompleks na osnove mykroélektromekhanicheskoho sensora* / A.A. Vodka, A.I. Trubaev, Yu.N. Ulyanov // *Newsletter of the Shidnoukrainian National University named after. V. Dahl. – Lugansk, 2012. – No. 9 (180). Part 1. – pp. 140-147*.
11. Zebrov V.V. Analysis of the structures of vibration-isolating supports of metal-cutting machines. *Analiz konstruktsiy vibroizoliruyushchikh opor metallovezhushchikh stankov* / V.V. Zebrov, T.S. Balakina, E.A. Vladetskaya // *Progressive directions of development of machine-tool-building industries and transport: materials mezhdunar. scientific and technical conf. student, asst. and minor of scientists, Sevastopol, May 12-16, 2008 - Sevastopol: Sev NTU Publishing House, 2008. - P. 124-125*.
12. Reznik D. O., Polishchuk I. A. System of vibration diagnostics, forecasting of performance and assessment of the performance of a turbogenerator. *Systema vibrodiahnostyky, prohnouzuvannya vidmov ta otsinky stanu turbogenerators*. Young ideas. 2019. No. 11 (75). pp. 694–697.
14. N.S.Ahirroo, Dr.S.P.Bhosle, Dr.D.V.Nehete // *Dynamics and Vibration Measurements in Engines*// 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, 2018.
15. Renaud F., Dion J.-L., Chevallier G., Tawfiq I., Lemaire R. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier. 2011. 25. P. 991–1010.

Soroka V.V., Horokhovska O.K.

PRACTICAL APPLICATION OF THE METHOD OF AUTOMATIC ADAPTATION OF VIBRATION DIAGNOSTICS SIGNALS TO THRESHOLD VALUES

The aim of the article is to test the developed methods, which are part of the complex method of vibration diagnostics of the main power plant of water transport means. This goal is achieved by in-depth analysis of the theoretical foundations of vibration diagnostics of control objects, as set out in modern sources of information, as well as direct application of the developed theoretical methods for conducting a comprehensive vibration diagnostic of the main power plant of water transport. It has been proved that the simplest way is to analyse the general levels of standard frequency bands when determining the vibration state of equipment. In this case, the general levels of standard frequency bands are compared with the threshold values set for different types of machines. The close relationship between these values and the thresholds given in the annexes of the standards for the respective types of equipment and obtained during operation is emphasised. In the process of monitoring the general technical condition of the main power plant of waterborne transport means, a set of octave and third-octave filters with a constant relative width, which form a broadband spectrum, is most often used. When analysing the spectra of sub-octave bands, the level of each band is compared with threshold values, which requires additional processing. The most significant result of the study is the establishment of the fact that the developed method allows detecting a change in state either at the same time or earlier than the standard approach. It is confirmed that the result is especially effective for signals without transients and for high degradation rates that exceed the rate of maximum fluctuations, which is important for operational control for the purpose of managing critical equipment. The proposed method of constructing thresholds allows to increase the speed of response to growth associated with accelerated degradation. At the same time, the advantage of approximation on the interval corresponding to the latest trend is proved.

Keywords: signal, vibration diagnostics, threshold, main power plant, filter, fluctuation

УДК 681.5.04

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.09

Шаніро Г.В., Боріна М.В.

ПРОВЕДЕННЯ ОЦІНКИ СТУПЕНЯ ОБҐРУНТОВАНOSTІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТОДІВ І СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУДНОВОДІННЯ

Анотація. У ході дослідження проведена оцінка ступеня обґрунтованості прийняття рішень при використанні розроблених методів і системи інформаційного забезпечення судноводіння. Проведено порівняльний аналіз оцінювання адекватності та повноти інформаційної моделі оцінки обстановки, що подаються судноводію наявними способами та за використання запропонованих методів та досліджена оцінка ефективності удосконаленої моделі з використанням відомих в теорії моделювання показників достовірності, оперативності й повноти показує її більшу ефективність у порівнянні з існуючою. Запропоновано алгоритми, які дадуть змогу реалізувати автоматизоване вирішення завдань розпізнавання та ситуаційного аналізу надводної обстановки. Робота алгоритму ініціюється на вимогу користувача при зміні значень у базі даних інформаційних ознак або після модифікації бази знань про обстановку.

Ключові слова: безпека мореплавання, інформаційна модель, навігація, нечітка нейронна мережа, прийняття рішення, розпізнавання надводної обстановки, розпізнавання ситуацій, рух судна, система управління рухом суден, технічні засоби судноводіння, формалізація, штучний інтелект.

Актуальність дослідження. Однією з основних функцій керованих й автоматичних транспортних засобів є автоматичне планування руху, необхідне для їхньої навігації. При функціонуванні у важкодоступних або небезпечних середовищах судна повинні не лише долати шлях до потрібного місця, використовуючи інформацію з різних джерел і сприймаючи навколишнє середовище за допомогою низки електронних датчиків, але й будувати поточну карту середовища.

Також передбачається, що комерційні транспортні засоби будуть здатні здійснювати навігацію автономно. У цій сфері було досягнуто багато успіхів завдяки водним транспортним засобам, що керуються людиною. Однак незабаром можуть бути реалізовані й автономні системи, хоча для них все ще існують проблеми, пов'язані з роботою в реальних умовах, а також безпека і надійність системи.

Середовище, в якому рухається судно, є невизначеним і постійно змінюється. Конфігурація і орієнтація перешкод змінюються, у тому числі разом з ландшафтом або рельєфом місцевості. Метою навігації з допомогою системи підтримки прийняття рішення (СППР) судноводієм є створення мобільної платформи, яка здатна успішно орієнтуватися в таких умовах, надаючи допомогу людині. Результати методів, на яких базуються методи навігації, різняться залежно від доступних обчислювального часу і ресурсів, динамічної і статичної пам'яті, точності та ефективності роботи очікуваної від СППР. Багато чого залежить від характеристики середовища, в якому судно виконує завдання. З цього погляду можна середовища можна класифікувати як прості (структуровані або відомі), напівструктуровані (частково відомі) і неструктуровані (невідомі) середовища, з якими набагато складніше працювати.

Більшість методів сильно залежать від сенсорної інформації, зібраної про навколишнє середовище, попередньо завантажених карт, їхнього створення та оновлення. Однак, саме датчики вносять певну невизначеність в інформацію про середовище, що надходить й обробляється. Для подолання цієї проблеми часто використовують технології на основі нечіткої логіки і нейронні мережі для обчислень, що відносяться до категорії м'яких технологій. Дані підходи виявилися придатними завдяки їхній здатності обробляти великі складні обчислення, що мають справу з невизначеними або неточними даними.

Таким чином, розробка навігаційних механізмів на основі штучного інтелекту на основі систем нечіткого виведення та штучних нейронних мереж для суден різного класу є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень. Питання застосування методів нечіткої логіки і нейронних мереж для навігації транспортних засобів цікавлять науковців всього світу.

Лю та ін. [1] описали контролер нечіткої логіки для навігації в умовах, що динамічно змінюються, в реальному часі, що дозволяє виконувати стикування та об'їзд перешкод в режимі он-лайн за допомогою невеликої кількості інформації від недорогої гідролакаційної системи.

Саймон та ін. [2] організували навігацію апарата, пов'язану з наявними зовнішніми датчиками, які збирають інформацію з навколишнього середовища за допомогою вимірювань близькості до перешкод за допомогою візуальних або оптичних датчиків або стереоскопічного зору. На основі обчисленого оптичного потоку порівнюються видимі швидкості зображення на обох камерах для навігації автономного робота.

Кумар та ін. [3] описали систему, в якій використовуються інфрачервоні датчики наближення для виявлення перешкод, а також інфрачервоні датчики для навігації автономного робота. Робот повинен слідувати заздалегідь визначеним шляхом, який має різні повороти. Нечітка логіка, присутня в мікроконтролері, визначає швидкість мобільного робота.

Castillo et.al [4] використали нечітку логіку для відстеження траєкторії та керування

роботом. Для отримання асимптотичної стабілізації положення та орієнтації робота навколо бажаної траєкторії в контролерах нечіткої логіки використовується підхід зворотного кроку. Для побудови контролера була використана система нечіткого виводу Mamdani Fuzzy Inference з гарними правилами IF-THEN. В якості лінгвістичних змінних були взяті входні крутні моменти і швидкості, а для дефазифікації нечітких множин був використаний метод центроїда площі.

Фатмі та ін. [5] розглядають проблеми автономної навігації мобільного робота в переповненому перешкодами та непередбачуваному мінливому середовищі. Для структурування навігаційної задачі при вирішенні цих проблем використовуються навігаційні підходи, засновані на поведінці за допомогою нечіткої логіки. Для скорочення часу і заощадження обчислювальних ресурсів в описаному методі застосовано багаторівневий підхід, де рівень контролю, заснований на контексті, використовується для прийняття рішення про вибір для активування конкретної поведінки, на відміну від обробки всіх поведінок, а потім змішування тих, які вважаються відповідними.

У дослідженні Malhotra et.al [6] обговорюється розробка мобільного робота для середовища зі статичними і рухомими перешкодами, про які мобільний робот не має попередньої інформації. Для виявлення перешкод було використано розробку нечіткого мозку для автономного робота. За стратегію об'їзду перешкод використано метод штучного потенційного поля, реалізований за допомогою нечіткої логіки.

Сінгх та ін. [7] для керування мобільним роботом застосували кількісні переваги бажаних характеристик, визначених над множиною всіх можливих керуючих дій. Це було зроблено з точки зору мети, з якою має бути пов'язана конкретна поведінка. Результати контролю використовуються для обчислення бажаності контролю, яке використовує лише один рівень оцінювання. Також пропонується розширення, яке включає послідовність контролів таким чином, що теперішні дії можуть бути здійснені з урахуванням більшої кількості майбутніх умов, які можуть виникнути в майбутньому, що нагадує техніку дерева ігор. Друге пропоноване розширення полягає в тому, щоб приймати входні дані з датчиків як нечіткі змінні і моделювати їх, щоб врахувати більш реалістичну зашумлену і залежну від часу природу більшості датчиків.

Ramos et.al [8] обговорили алгоритм прийняття нечітких рішень, який координує поведінку мобільного робота, яка належить до арбітражного класу механізмів управління поведінкою. У цьому класі одночасно виконується лише одна поведінка. Для ієрархічної поведінки можна використовувати ієрархічний механізм прийняття нечітких рішень, який здатний представляти певну модель світу, в якій робот може еволюціонувати. Нечіткий оператор використовується для агрегування цілей і обмежень, і поведінка з максимальним результатом приймається як оптимальний вибір.

Для спрямування робота в незнайомому середовищі до заданої мети Busquets et.al [9] використали нечітку логіку. Для зовнішньої навігації використовується детальна і точна метрична карта навколишнього середовища, отримана за допомогою одометричних датчиків, розташованих на мобільній платформі, використовуючи зібрану візуальну інформацію про навколишнє середовище. Робот розпізнає візуальні об'єкти і використовувати їх для картографування та навігації, використовуючи агентів для вирішенні проблем, пов'язаних з динамічною і неточною інформацією про навколишнє середовище за допомогою обчислювального інтелекту і теорії агентів.

Фігейредо та ін. [10] описують метод використання інтелектуальних агентів для управління роботом, який був змодельований за допомогою симулятора Khepera. Інтелект цих агентів базується на системі нечіткої логіки, а поведінка агента в кожен момент часу визначається за допомогою набору нечітких правил. Для системи управління, яка повинна бути здатна уникати тупикових ситуацій, знову успішно поєднані обчислювальний інтелект і теорія агентів.

Вей та ін. [11] у своєму дослідженні стверджують, що шляхом створення компромісу з низьким контролем поведінки можна сформулювати ефективну стратегію. Глобальному планувальнику потрібно лише створити декілька позицій підцілей, а не точних геометричних

шляхів. Відносно просто видалити або додати ці підцілі з планувальника або в нього.

Вей Лі [12] описав стратегію навігації роботів, яка використовує нечітку логіку і може бути застосована до невизначених середовищ. Вона розроблена за допомогою процесу мультисенсорної інтеграції. Конфлікти та конкуренція виникають під час множинної реактивної поведінки. Проведене дослідження зосереджене на ефективній координації цих відмінностей за допомогою нечітких множин та бази правил.

Цо та ін. [13] зазначили, що ефективність автоматичних керованих транспортних засобів вимірюється помилками в їхньому положенні та орієнтації. Спочатку розроблено лінійний контролер, продуктивність якого в подальшому покращується за рахунок застосування нечіткої логіки. Відповідно, сформовано два нечітко-логічні регулятори. Критерій Гурвіца, критерій Попова та метод фазової площини використовуються для демонстрації стійкості системи.

Бірсель Айрулу та Біллур Баршан [14] використовували нейронні мережі та досліджували обробку сигналів гідролокатора для надійної диференціації типових ознак. Розглянуто навчання модульних та немодульних нейронних мереж за методом зворотного поширення з використанням алгоритмів генерації-зменшення, який показав кращу здатність до узагальнення та інтерполяції і добру швидкість збіжності. Виявлено, що нейронні мережі можуть розрізняти більше цілей, використовуючи лише один сенсорний вузол, і видавати вищий відсоток правильної диференціації у порівнянні з декількома сенсорними вузлами. Сенсорний вузол визначається як пара датчиків з фіксованою відстанню між ними, які можуть обертатися і сканувати ціль для збору даних. Було сказано, що ефективність інших методів була б гіршою, якби кількість сенсорних вузлів була зменшена. Підхід з використанням нейронних мереж демонструє уникнення перешкод, побудову карт, відстеження цілей, навігації тощо для автономних мобільних роботів.

Франко Скарселлі (Franco Scarselli) та Ах Чун Цой (Ah Chung Tsoi) [15] досліджували нещодавні роботи за допомогою нейронних мереж прямого поширення для забезпечення заданої точності апроксимації. Для досягнення заданої точності апроксимації нейронна мережа має кілька прихованих шарів. Запропоновані алгоритми навчання успішно уникають локальних мінімумів, що є проблемою, з якою зазвичай стикаються деякі алгоритми навчання нейронних мереж.

Soylu et.al [16] розглянули особливий тип задачі маршрутизації автоматичного керованого транспортного засобу. Ця конкретна задача є прикладом асиметричної задачі комівояжера, для розв'язання якої на основі карт Кохонена, що самоорганізуються, запроваджено алгоритм штучної нейронної мережі, які порівнювалися з результатами, отриманими за допомогою правила найближчого сусіда та правила оптимального рішення і показали позитивні результати щодо часу обчислень.

Orille et.al [17] обговорюють використання багат шарової нейронної мережі, яка розвивається за аналогією з традиційним методом таблиці перемикання для прямого керування моментом асинхронного двигуна, що дозволяє отримати оптимальні схеми перемикання. Було обрано відповідну нейронну мережу, яка представляє таблицю пошуку перемикань, розроблено ефективну конфігурацію нейронної мережі, а також проведено її тестування. Результат моделювання, отриманий за допомогою таблиці перемикання, використовується як еталон для оцінки продуктивності нейронної мережі.

Янг і Менг [18] розглянули проблему навігації мобільних роботів у реальному часі та планування руху без зіткнень з допомогою нейронних мереж, де кожен нейрон, присутній у топологічно організованій нейронній мережі, забезпечений лише локальними зв'язками. Рух мобільного робота або маніпулятора в реальному часі планується через динамічний ландшафт активності нейронної мережі. Проведений якісний аналіз та теорія стійкості Ляпунова підтверджує глобальну стійкість нейронної мережі.

Barbera et.al [19] зосередилися на розробці мобільного робота, який оснащений ненадійним сонаром та інфрачервоними датчиками і може орієнтуватися в невідомому і неструктурованому середовищі, виконуючи завдання з доставки. Нейронні мережі використані для реалізації функції об'єднання сенсорів. Процедура навчання нейронної мережі була

автоматизована.

Pomerleau [20] описує систему навчання – ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network – автономний наземний транспортний засіб у нейронній мережі), застосовану до автономного водіння або навігації на основі зору у постійній зміні навколишнього середовища та одночасній обробці інформації в реальному часі, працюючи з перешкодами.

Glasius et.al [21] показали, що ефективне планування маршруту та уникнення перешкод може бути досягнуто за допомогою моделі топологічно організованої нейронної мережі, яка належить до типу Хопфілда і має нелінійні аналогові нейрони. Детермінована система здатна миттєво прокласти відповідний шлях від довільної точки до будь-якої цільової позиції, уникаючи статичних і рухомих перешкод. Шлях визначається динамікою нейронної мережі та градієнтом нейронної активності на топологічно впорядкованій нейронній карті.

Мета дослідження полягає у проведенні оцінки ступеня обґрунтованості прийняття рішень при використанні розроблених методів і системи інформаційного забезпечення

Виклад основного матеріалу. Обґрунтованість прийняття рішень з оцінки обстановки в районі плавання характеризується повнотою представлення даних про обстановку, а також точністю і повнотою відображення в інформаційній моделі (ІМ) інформаційних ознак з урахуванням їхньої важливості відповідно до характеру діяльності судноводія [22]:

$$R = 1 - \sum_{j=1}^4 \beta_j \cdot \sum_{i \in q_i} a_i, \quad (1)$$

де β_j – відносне середнє значення похибки, що вноситься у відображення обстановки через неточне (узагальнене) врахування факторів. При цьому:

$\beta_1 = 0$ при безпосередньому врахуванні значущого фактору шляхом задання його значення, що відповідає реальному процесу (умові обстановки);

$\beta_2 = 0,445$ при простому узагальненні (заміні сукупності однорідних за фізичним змістом факторів одним);

$\beta_3 = 0,6$ при функціональному узагальненні різнорідних чинників для відображення їх однією представницькою величиною;

$\beta_4 = 1$ при непрямому врахуванні факторів. Вимоги до відображення інформації визначаються її прагматичним змістом і точністю представлення обстановки на засобах відображення для її сприйняття;

a_i – вага важливості врахування в моделі обстановки i -ої інформаційної ознаки у відносних одиницях;

q_i – множина інформаційних ознак, що враховуються в інформаційній моделі j -им способом узагальнення.

Ступінь очікуваної повноти відображення реальної обстановки в інформаційній моделі визначається за формулою:

$$Y = \sum_{k=1}^Q \xi_k \cdot R_k \cdot P_k, \quad (2)$$

де ξ_k , ($k = \overline{1, Q}$) – вага важливості у відносних одиницях кожного з Q параметрів обстановки, що представляються моделлю ($k = 1, 2, \dots, Q$);

R_k і P_k – показники достовірності та оперативності представлення даних обстановки інформаційною моделлю, що розглядається.

Як узагальнений показник ефективності інформаційної моделі під час порівняння моделі з наявними та оцінки наближення за ефективністю до ідеальної моделі використано співвідношення [23]:

$$W = \frac{Y - Y_c}{1 - Y_c}, \quad (3)$$

де Y – показник повноти розглянутої моделі;

Y_c – показник повноти порівнюваного з нею аналога.

Результати порівняльного оцінювання адекватності та повноти інформаційної моделі оцінки обстановки, що подаються судноводію наявними способами та за використання

запропонованих методів, наведено у таблиці 1 та на рис. 1 - 3.

Таблиця 1 – Значення показників ефективності удосконаленої та існуючої методик
Джерело: розроблено автором

№ з/п	Показник	Значення для моделей	
		Удосконаленої	Існуючої
1.	Достовірність (R)	0,551	0,408
2.	Оперативність (P)	0,632	0,532
3.	Повнота (Y)	0,348	0,258
4.	Загальний показник ефективності (W)	0,860	

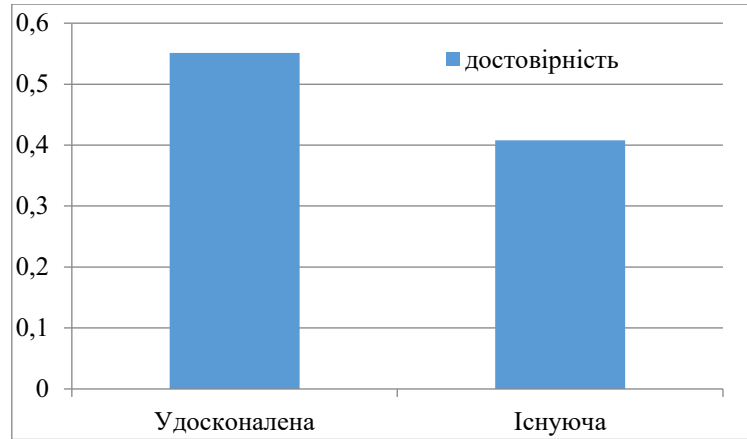


Рис. 1 – Оцінювання достовірності інформаційних моделей
Джерело: розроблено автором

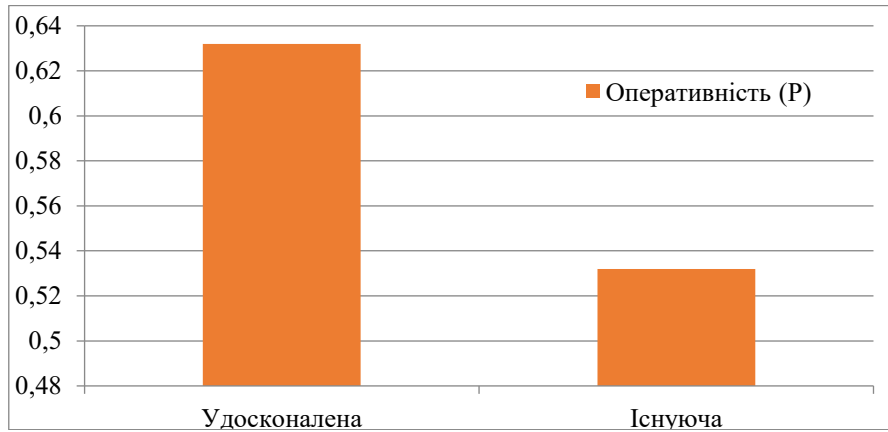


Рис. 2 – Оцінювання оперативності інформаційних моделей
Джерело: розроблено автором

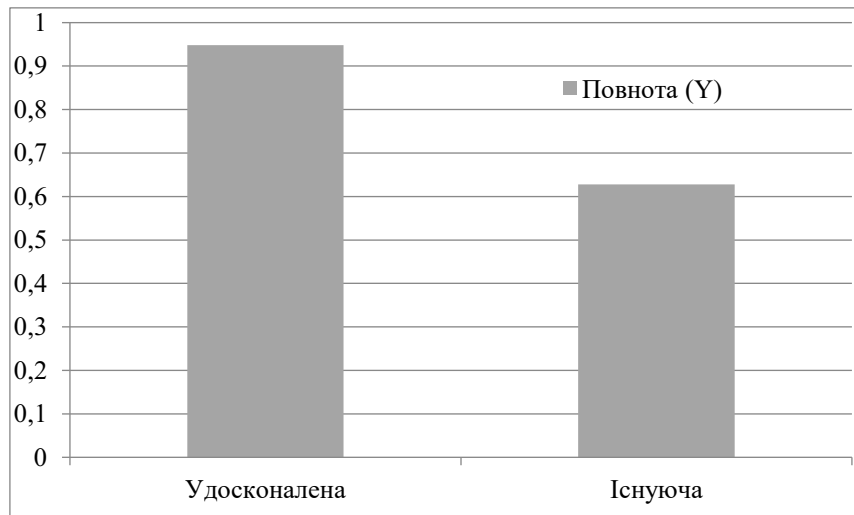


Рис. 3 – Оцінювання повноти інформаційних моделей
Джерело: розроблено автором

Таким чином, оцінка ефективності удосконаленої моделі з використанням відомих в теорії моделювання показників достовірності, оперативності й повноти показує її більшу ефективність у порівнянні з існуючою.

При розробці алгоритму розпізнавання обстановки (рис. 4) врахуємо отримані результати. Робота алгоритму ініціюється на вимогу користувача при зміні значень у базі даних (БД) інформаційних ознак або після модифікації БЗ про обстановку. Якщо під час перевірки близькості поточної та апріорно заданої обстановки є зміни, то модифікується БД поточної обстановки. В іншому разі очікується введення команд користувача або модифікації бази даних ІО. Модифіковані дані про обстановку стають доступними для інших програмних процесів у системі управління судном, а дані про попередні стани обстановки зберігаються в історії змін цієї ж БД.

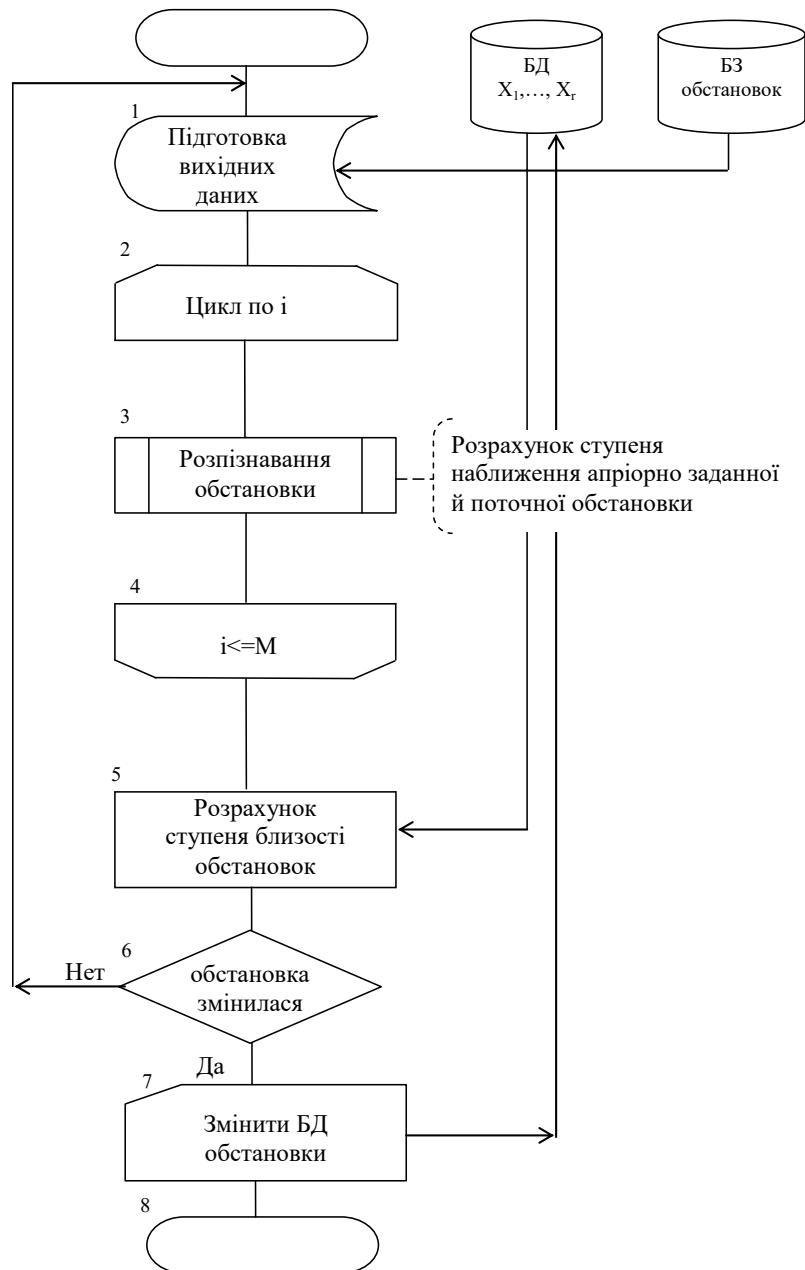


Рис. 4 – Схема процедури розпізнавання надводної обстановки
Джерело: розроблено автором

Оцінимо основні характеристики розробленого алгоритму розпізнавання.

Найважливішим показником ефективності систем розпізнавання є ймовірність отримання правильних рішень ($P_{\text{пр}}$) під час розпізнавання об'єктів, що належать до різних класів [24]. Він залежить від:

- помилок апріорного опису класів (φ_1);
- помилок визначення ознак розпізнаваних об'єктів (φ_2);
- кількості та властивостей використовуваних ознак (φ_3):

$$P_{\text{пр}} = f(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3). \quad (4)$$

Часто, наприклад, за логічної моделі розпізнавання, використовують оцінку надійності розпізнавання, яка, відповідно до [25], визначається як:

$$\xi_g = \frac{\frac{1}{L_w}}{\sum_{S=1}^n \frac{1}{L_S}}, \quad (5)$$

де L_w – міра близькості w -го об'єкта;

L_S – S -те значення міри близькості.

У даному випадку величина ξ_g відіграє роль, подібну до ймовірності правильного розпізнавання $P_{\text{пр}}$:

$$\sum_{g=1}^n \xi_g = 1. \quad (6)$$

Відомий ще один показник – час розпізнавання об'єкта T_p :

$$T_p = \sum_{r=1}^2 T_{pr}, \quad (7)$$

де T_{p1} – час, що витрачається на розрахунок міри близькості L_w ;

T_{p2} – час на прийняття рішення щодо приналежності розпізнаваного об'єкта до одного із заданих класів об'єктів.

Для оцінки ефективності розпізнавання надводної обстановки використовуємо показник (4) та середню ймовірність відмови від розпізнавання $P_{\text{відм}}$ (безвідмовність розпізнавання).

У загальному випадку за кількох альтернативних варіантів обстановки ($i = \overline{1, n}$) “найкращу” вибирають шляхом оптимізації цільової функції:

$$F^* = \max_{X \in \Omega_X} F(X, P_{\text{пр}}, P_{\text{відм}}), \quad (8)$$

де $X = [x_q]$ – множина рішень;

$$x_q = \begin{cases} 1, & q - \text{ий варіант моделі вибраний;} \\ 0, & \text{в іншому випадку;} \end{cases}$$

$$\sum_q x_q = 1;$$

Ω_X – множина можливих варіантів моделей обстановки;

$P_{\text{пр}} = [P_{\text{пр}i}]$; $P_{\text{відм}} = [P_{\text{відм}i}]$.

Аналітичні залежності для $P_{\text{пр}}$ та $P_{\text{відм}}$ отримати, як правило, дуже важко. Для їх оцінок використовують результати імітаційного моделювання. Так, отримано оцінки $P_{\text{пр}}$ та $P_{\text{відм}}$ для розглянутої вище моделі, заснованої на розробленій гібридній моделі знань. Порівняльна оцінка запропонованої моделі з комбінованою моделлю для вирішення завдання розпізнавання (табл. 2) показує перевагу розробленого методу. Так, $P_{\text{пр}}$ збільшується на 20-25% і $P_{\text{відм}}$ зменшується на 7-9%. Це дає змогу обґрунтовано використовувати розроблену модель розпізнавання на практиці.

Розроблений алгоритм розпізнавання може бути включений до складу алгоритмів автоматизованої системи управління судном.

Таблиця 2 – Порівняльна оцінка методів розпізнавання

Джерело: розроблено автором

Метод розпізнавання	$P_{\text{пр}}$	$P_{\text{відм}}$
Комбінована модель	0,49 – 0,62	0,38 – 0,27
Розроблений метод	0,63 – 0,94	0,31 – 0,06

Проведено порівняльну оцінку технологічних властивостей розроблених методів, реалізованих різними способами. Пропоновані методи належать до числа відкритих. Специфіка

даного типу вирішуваних завдань враховується при заповненні БЗ та структури створюваної БД. У процесі супроводження необхідно постійно вносити зміни до БЗ, викликані появою нових типів об'єктів, що взаємодіють, зміною законодавства, накопиченням досвіду оцінки обстановки тощо.

Для формалізації запропонованих методів розпізнавання в останні роки у практиці проектування складних систем найчастіше використовують об'єктно-орієнтоване проектування (ООП) програмного забезпечення. У процесі його супроводу у ньому можуть відбутися такі зміни:

- додавання нового класу;
- зміна реалізації класу;
- зміна інтерфейсу класу.

Усі ці зміни вимагають великих витрат, хоча і є природними операціями.

Використання розробленого методу формалізації знань при оцінці обстановки та управлінні ІМ дозволяє отримати вигоди для таких показників технологічності:

1. Зменшення потрібного часу модернізації СПЗ.

Загальна тривалість коригування $t_{\text{кор}}^{\text{трад}}$ СПЗ, побудованого на традиційних підходах, визначається як:

$$t_{\text{кор}}^{\text{трад}} = t_{\text{зн}} + t_{\text{викл}} + t_{\text{приб}} + t_{\text{узг}} + t_{\text{ан}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{випр}} + t_{\text{пов}}, \quad (9)$$

де $t_{\text{зн}}$ – час зняття з рейсу;

$t_{\text{викл}}$ – час виклику представника організації-розробника СПЗ;

$t_{\text{приб}}$ – час прибуття представника організації-розробника;

$t_{\text{узг}}$ – час узгодження внесених змін;

$t_{\text{ан}}$ – час аналізу та вивчення завдання;

$t_{\text{зм}}$ – програмування, налагодження і тестування програмних модулів;

$t_{\text{випр}}$ – час приймально-здавальних випробувань;

$t_{\text{пов}}$ – час повернення судна до строю.

Для суднового персоналу час внесення коректур у БЗ становить [26]:

$$t_{\text{кор}}^{\text{СППР}} = t_{\text{узг}} + t_{\text{пз}} + t_{\text{зая}} + t_{\text{зм}}, \quad (10)$$

де $t_{\text{узг}}$ – час аналізу та узгодження змін, що вносяться до БЗ;

$t_{\text{пз}}$ – час постановки завдання когнітологу;

$t_{\text{зая}}$ – час з'ясування та аналіз завдання когнітологом;

$t_{\text{зм}}$ – внесення змін, тестування і налагодження БЗ.

Графічна ілюстрація часу корекції СПЗ для різних варіантів його побудови, наведена на рис. 5. Підвищення оперативності внесення коректур до СПЗ АСУ зумовлено скороченням змісту і тривалості організаційних етапів поповнення БЗ.

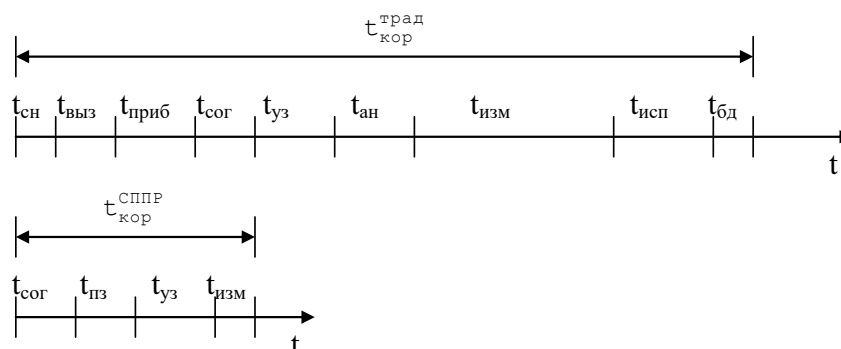


Рис. 5 – Часова діаграма процесу модифікації спеціального програмного забезпечення

Згідно з [26], $t_{\text{кор}}^{\text{трад}} = 94 + 68,8n$ (годин), а $t_{\text{кор}}^{\text{СППР}} = 12 + 16,4n$ (годин), де n – кількість цільових вершин у мережевій моделі.

2. Зменшення кількості помилок, що вносяться під час модифікації. Класи в ООП є угодами про зв'язки між абстракціями. Це дає змогу вже на ранніх стадіях створення СПЗ виявляти й усувати до 95% помилок і значно зменшити кількість помилок, що вносяться під час модифікації СПЗ у процесі супроводу [26]. Крім того, ООП дозволяє будувати системи на основі "стабільних" проміжних описів. Це спрощує процес внесення змін і зменшує кількість внесених помилок.

3. Зниження трудовитрат при супроводі СПЗ. З життєвого циклу пропонованих програм у 3-7 років до 70-90% часу становить супровід [26]. Але в умовах масового тиражування і тривалого часу супроводу, коли витрати на проектування і створення СПЗ є значно меншими за витрати на супровід, останні вимагають суттєвого скорочення.

ООП змінює часові співвідношення між створенням і супроводом СПЗ. Загальні трудовитрати, необхідні при об'єктно-орієнтованому і традиційному проектуванні, є приблизно рівними. Але на супроводженні СПЗ під час ООП припадає їх незначна частина. Отже, ООП найповніше відповідає методології побудови СПЗ.

Висновки. У ході дослідження автором запропоновано алгоритми, які дадуть змогу реалізувати автоматизоване вирішення завдань розпізнавання та ситуаційного аналізу надводної обстановки. Робота алгоритму ініціюється на вимогу користувача при зміні значень у базі даних (БД) інформаційних ознак або після модифікації БЗ про обстановку

ЛІТЕРАТУРА

1. Liu K. & Lewis F.L.; —Fuzzy Logic based Navigation Controller For An Autonomous Mobile Robot; IEEE, Vol. 7, pp.49-63, 1989.
2. Simon Dan & Peri Vamsi Mohan; —Fuzzy Logic Control For An Autonomous Robot; IEEE Competition, Vol. 6, No.4, pp.445-454, 1990.
3. Harisha S.K., Kumar Ramkanth P., Sharma S.C.; —Fuzzy Logic Reasoning To Control Mobile Robot On Pre-Defined Strip Path; Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 4, pp.539-546, 2003.
4. Castillo Oscar, Aguilar Luis T., Cardinas Selene; —Fuzzy Logic Tracking Control For Unicycle Mobile Robots; Engineering Letters, pp. 73-82, 2003.
5. Fatmi Anis, Yahmadi Amur Al, Khriji Lazhar, Masmoudi Nouri; —A Fuzzy Logic Based Navigation of a Mobile Robot; Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 159-177, 1995.
6. Malhotra Rajiv, Sarkar Atri; —Development of a Fuzzy Logic Based Mobile Robot for Dynamic Obstacle Avoidance and Goal Acquisition in an Unstructured Environment; Proceedings of IEEE/ASME, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.235-247, 2003.
7. Singh Harmeet, Arora Sanchit; —Using Fuzzy Logic for Mobile Robot Control; IIT-D manuals, India, 2006.
8. Ramos Nelson, Lima Pedro U., Sousa Joao M.C.; —Robot Behaviour Coordination Based On Fuzzy Decision-Making; GCAR, IDMEC, Portugal, pp. 145-172.
9. Busquets D., Sierra C., Mantaras R.Lopez De; —A Multi-Agent Approach to Fuzzy Landmark-Based Navigation; Multi-Valued Logic & Soft Computing, pp.971-978, 1995.
10. Figueiredo K., Vellasco M., Pacheco M.A.; —Mobile robot control using intelligent agents; Second international workshop on Intelligent systems design and application, pp.159-173, 1999.
11. Li Wei, Chen Zushun, Ma Chenyu, Fuzzy Logic based Behaviour Fusion for Navigation of an Intelligent Mobile Robot, Journal of Computer Science & Technology, pp. 125-132, 1999.
12. Li wei, Fuzzy Logic Based Robot Navigation In Uncertain Environment By Multisensor Integration; IEEE Proceeding of the 1994 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and

Integration for Intelligent Systems (MFI'94); Las Vegas, Nevada; Oct 1994.

13. Tso S.K., Fung Y.H. & Cheung Y.P.; —Fuzzy-logic Control for Differential-wheel-drive AGVs Using Linear Opto-sensor Arrays; Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota - April 1996.
14. Ayrulu Birsell, Barshan Billur; —Neural networks for improved target differentiation and localization with sonar; Neural Networks 14 (2001) 355-373.
15. Scarselli Franco, Tsoi Ah Chung; —Universal Approximation Using Feedforward Neural Networks: A Survey of Some Existing Methods, and Some New Results; Neural Networks, Vol. 11, No. 1, pp. 15–37, 1998.
16. Soylu Mustafa, Ozdemirel Nur E., Kayaligil Sinan; —Theory and Methodology A self-organizing neural network approach for the single AGV routing problem; European Journal of Operational Research 121 (2000) 124-137.
17. Orille A. L., Sowilam G.M.; —An Application Of Neural Networks For Direct Torque Control; Computers & Industrial Engineering 37 (1999) 391-394.
18. Yang Simon X., Meng Max; —An efficient neural network approach to dynamic robot motion planning; Neural Networks 13 (2000) 143–148.
19. Barberá H. Martínez, Skarmeta A. Gómez, Izquierdo M. Zamora, Blaya J. Botía; Neural Networks for Sonar and Infrared Sensors Fusion; In Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion, 2000. FUSION 2000.
20. Pomerleau Dean A.; —Knowledge-based Training of Artificial Neural Networks for Autonomous Robot Driving.
21. Glasius Roy, Komoda Andrzej, Gielen Stan C. A. M.; —Neural Network Dynamics for Path Planning and Obstacle Avoidance.
22. Мельник О.В., Шапран Ю.С., Матюхов А.Т., Бойко О.А. Дослідження системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння / Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(32). 2021.
23. Khayat, O. Structural parameter tuning of the first-order derivative of an adaptive neuro-fuzzy system for chaotic function modeling. J. Int. Fuzzy Syst. 2014, 27, 235–245.
24. Li, S.P. Adaptive control with optimal tracking performance. Int. J. Syst. Sci. 2018, 49, 496–510.
25. Volodymyr Shymkovych, Veronika Niechkina. The criterion for determining the buffering time of the measuring channel for smoothing the variable changes of the sensor signal // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine. 2020. pp. 343-346.
26. Zak B. Modelling of ship's motion using artificial neural networks. – Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press, 2001. – P. 298–303.

Shapiro H.V., Borina M.V.

EVALUATION OF THE DEGREE OF VALIDITY OF DECISION-MAKING WHEN USING METHODS AND SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT OF NAVIGATION

The study assesses the degree of validity of decision-making when using the developed methods and system of information support of navigation. A comparative analysis of the assessment of adequacy and completeness of the information model of situation assessment provided to the navigator by existing methods and using the proposed methods is carried out, and the study of the efficiency of the improved model using the indicators of reliability, efficiency and completeness known in the theory of modelling shows its greater efficiency compared to the existing one. Algorithms are proposed that will allow to implement an automated solution to the tasks of recognition and situational analysis of the surface situation. The algorithm is initiated at the user's request when the values in the database of information features change or after modification of the knowledge base about the situation.

Keywords: *maritime safety, information model, navigation, fuzzy neural network, decision-making, surface situation recognition, situation recognition, ship movement, ship traffic control system, technical means of navigation, formalisation, artificial intelligence.*

Голіков В.В., Сінюта К.О.

ГЛИБОКЕ НАВЧАННЯ У КОНТЕКСТІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МОРСЬКІЙ НАВІГАЦІЇ: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У статті детально проаналізовано перспективи застосування технологій глибокого навчання в галузі морської навігації. Показано, що глибоке навчання дозволяє автоматизувати та значно підвищити якість таких процесів: розпізнавання та класифікація суден за візуальними характеристиками, виявлення перешкод на шляху руху судна, моніторинг та аналіз даних з бортових сенсорів, прогнозування аварійних ситуацій, розробка систем доповненої реальності для поліпшення навігації, створення віртуальних тренажерів, точне прогнозування погодних умов, автоматизоване керування рухом судна.

Огляд літератури показує, що глибокі нейронні мережі дозволяють значно підвищити якість об'єднання зображень з різних датчиків для виявлення суден, проаналізувати великі масиви даних з бортових сенсорів, розробити ефективні системи доповненої реальності для навігації, створити реалістичні віртуальні тренажери, побудувати точні моделі прогнозу погоди, реалізувати автоматизоване керування рухом судна на основі глибокого навчання.

Автори наголошують, що для успішного впровадження технологій глибокого навчання в морській навігації необхідна подальша оптимізація алгоритмів під конкретні задачі, інтеграція даних з додаткових датчиків, розробка спеціалізованих архітектур глибоких нейромереж з урахуванням особливостей морського середовища, а також ретельне тестування систем в реальних умовах.

Особливу увагу слід приділяти питанням кібербезпеки та захисту систем керування від зламів. Також важливо розробляти методи ефективного навчання моделей на обмежених даних, типових для умов морської навігації.

Зроблено висновок, що інтеграція технологій глибокого навчання відкриває значні перспективи для автоматизації та підвищення ефективності і безпеки морського транспорту. Для успішного впровадження потрібні зусилля фахівців в галузі штучного інтелекту, обробки даних, морської інженерії та навігації.

Ключові слова: глибоке навчання, штучний інтелект, морська навігація, автоматизація, безпека

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасному контексті розвитку морської навігації особлива увага приділяється інтеграції методів штучного інтелекту, включаючи машинне навчання та нейронні мережі, а також глибоке навчання для оптимізації процесів управління морськими суднами. Штучний інтелект, як дисципліна комп'ютерних наук, надає ефективні засоби аналізу даних та автоматизації прийняття рішень, що є критичним аспектом у контексті сучасних стандартів безпеки та ефективності морської навігації. Глибоке навчання, як компонент штучного інтелекту, що базується на багатопроточних нейронних мережах, має видатну здатність отримувати складні закономірності з даних. Застосування глибокого навчання в судноплаванні спрямоване на створення інтелектуальних систем, здатних ефективно обробляти інформацію від різних джерел, таких як радары та GPS-трекери, та автоматизувати процеси аналізу та прийняття рішень. У цьому дослідженні ми фокусуємося на перспективах застосування методів штучного інтелекту, особливо глибокого навчання, у морській навігації. Через систематичний огляд літератури та аналіз існуючих досліджень, наша мета полягає у

виявленні конкретних областей застосування цих методів, підкреслюючи їхній потенціал для інновацій в управлінні морськими суднами та підвищення загальної ефективності навігаційних процесів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки відзначається активний прогрес у галузі інтеграції методів глибокого навчання у секторі морської навігації та управління судами.

Серія наукових досліджень присвячена застосуванню глибоких нейронних мереж з метою підвищення ефективності процесу розпізнавання об'єктів, таких як інші судна [2]. Також досліджується їх використання для аналізу даних, що надходять із бортових датчиків у режимі реального часу [3].

Додатковим важливим напрямом досліджень є розробка систем доповненої реальності [4], віртуальних тренажерів [5] та розв'язання задач прогнозування з використанням глибокого навчання [6, 7].

Загалом наявні наукові дослідження демонструють значний потенціал для покращення характеристик та підвищення рівня безпеки морської навігації, заснованих на технологіях глибокого навчання.

3. Мета дослідження. Метою цього дослідження є критичний аналіз та систематизація існуючих досліджень у галузі застосування штучного інтелекту, включаючи глибоке навчання, для управління морськими судами. Основним завданням роботи є виявлення потенціалу, який надають методи штучного інтелекту в контексті судноводіння, а також визначення перспектив та можливостей для суттєвого покращення ефективності та безпеки морської навігації. Шляхом критичного огляду літератури та аналізу застосування зазначених технологій у реальних умовах ми прагнемо надати основний внесок у область дослідження, наголошуючи на важливості інтеграції штучного інтелекту в сучасні практики судноплавства.

4. Виклад основного матеріалу дослідження. Глибоке навчання (deep learning) є сегментом машинного навчання, що заснований на використанні багатошарових нейронних мереж, відомих як глибокі архітектури. У контексті судноводіння глибоке навчання надає перспективи реалізації вигідних додатків. Розглянуті напрямки включають:

Виявлення та класифікація об'єктів:

- **Розпізнавання суден:** Глибоке навчання може бути використане для автоматичного розпізнавання та класифікації суден за їх характеристиками та формою.

- **Виявлення перешкод:** Нейронні мережі можуть бути навчені знаходити та класифікувати перешкоди на маршруті судна, такі як інші судна, берегові лінії, крижини тощо.

Стаття [1] описує використання глибокого навчання для об'єднання інформації з видимих та інфрачервоних зображень для виявлення суден у морському середовищі. У статті представлено три архітектури об'єднання кількох модальностей зображень, які перевершують традиційні методи виявлення об'єктів. Автори статті провели експерименти на реальних наборах даних, які показали, що запропоновані архітектури забезпечують більш високу точність виявлення об'єктів та меншу кількість хибних спрацьовувань, ніж традиційні методи. В експериментах використовувалися глибокі нейронні мережі, такі як Multi-Scale CNN (MS-CNN), Densely Connected Convolutional Networks (DenseNet) та Deep Residual Learning (ResNet) для об'єднання інформації з видимих та інфрачервоних зображень.

Автори статті продемонстрували, що використання глибокого навчання для поєднання інформації з різних модальностей зображень може значно покращити точність виявлення суден у морському середовищі. Це може мати важливе значення для різних програм, таких як автономні судна, моніторинг морської безпеки та інші.

Розвиваючи тему перспектив використання глибокого навчання у сфері виявлення морських суден, можна назвати такі конкретні напрями:

1. Інтеграція додаткових датчиків: Розширення спектра використання глибокого навчання для інтеграції даних від додаткових датчиків, таких як радіохвильові, акустичні та інші. Це дозволить створити повнішу картину морської обстановки.

2. Оптимізація Роботи в Реальному Часі: Специфічні дослідження, спрямовані на оптимізацію алгоритмів глибокого навчання з метою забезпечення високої швидкості обробки даних та швидкого прийняття рішень у режимі реального часу.

3. Адаптація до ускладнених умов: Фокус на розробці моделей, здатних адаптуватися до складних умов морського середовища, таких як обмежена видимість, раптові зміни освітлення та наявність перешкод.

4. Інтеграція з Технологіями Штучного Інтелекту: Розгляд можливостей інтеграції глибокого навчання з іншими технологіями штучного інтелекту, такими як обробка природної мови та машинний зір, для створення більш комплексних систем виявлення та аналізу даних.

5. Застосування у Реальних Умовах: Проведення додаткових польових випробувань та експериментів у реальних умовах морської навігації для більш точної оцінки застосування та ефективності запропонованих методів.

6. Приділяти увагу Безпеці та Кіберзахисту: Дослідження аспектів кібербезпеки в контексті систем виявлення морських суден, включаючи захист від зломів та маніпуляцій із даними.

7. Розробка Спеціалізованих Рішень: Спеціалізований підхід до розробки глибоких архітектур, адаптованих до унікальних характеристик морської навігації, наприклад, з урахуванням специфіки форм та розмірів суден.

Такі конкретні дослідницькі напрями дозволять як поліпшити існуючі методи виявлення судів, а й створити ефективніші і надійні системи, здатні справлятися з різноманітними викликами морського середовища.

Обробка даних із суден:

- **Моніторинг та аналіз даних з бортових сенсорів:** Глибоке навчання може допомогти в обробці великих обсягів даних з різних сенсорів на борту судна, що може включати дані про стан судна, енергоспоживання, стан вантажу та інші параметри.

- **Діагностика та запобігання аваріям:** Аналіз даних з використанням глибокого навчання може допомогти виявляти потенційні проблеми в роботі судна та запобігати аваріям.

Метод глибокого навчання, що розглядається у статті [2] заснований на використанні нейронних мереж. У контексті автономних суден нейронні мережі можуть бути використані для аналізу поведінки суден і прийняття рішень в режимі реального часу. Для цього необхідно навчити нейронну мережу на великій кількості даних, які описують різні ситуації на морі, такі як рух інших суден, погодні умови тощо. Після навчання нейронної мережі вона може бути використана для аналізу поточної ситуації на морі і прийняття рішень на основі отриманих даних. Наприклад, якщо нейронна мережа виявляє, що рух іншого судна може призвести до зіткнення, вона може запропонувати змінити курс або швидкість судна, щоб уникнути зіткнення. Однією з головних переваг глибокого навчання є його здатність до навчання великих обсягах даних. Це дозволяє створювати моделі, які можуть опрацьовувати складні ситуації на морі та приймати рішення на основі цих даних. Автори статті описують використання згорткових нейронних мереж для класифікації зображень та визначення типу судна на основі його візуальних характеристик. Це може бути корисним для автономних суден, які повинні визначати типи судів навколо них і приймати відповідні рішення.

Також у статті наводиться приклад використання глибокого навчання для аналізу поведінки судів та визначення можливих ситуацій зіткнення. Автори описують використання рекурентних нейронних мереж для аналізу послідовності дій суден та визначення можливих наслідків цих дій. Крім того, автори статті описують використання глибокого навчання для створення моделей, які можуть навчатися на основі досвіду та покращувати свої рішення з часом. Це може бути корисно для автономних суден, які повинні адаптуватися до умов, що змінюються на морі і приймати відповідні рішення.

Аналіз статті [3] показує, що автори досліджували застосування методів машинного навчання для передбачення ймовірності виникнення аварій на контейнерних портах у Кореї. Вони виявили, що моделі випадкового лісу та градієнтного бустингу показали кращі результати у передбаченні аварій на порту, ніж інші моделі, такі як дерева рішень та метод опорних

векторів. Автори також обговорили обмеження використання методів машинного навчання для передбачення аварій на порту, такі як необхідність високоякісних даних та потенційний ризик спотворення результатів моделі через нерепрезентативність даних. Відповідь на питання, чи може глибоке навчання покращити результати, можна знайти у статті. Автори використали глибоке навчання у своїх дослідженнях і виявили, що модель глибокого нейронного мережевого навчання показала хороші результати у передбаченні аварій в порту. Однак вони також зазначили, що для досягнення високої точності та ефективності моделі глибокого навчання необхідно мати великий обсяг даних та високоякісні дані. Таким чином, глибоке навчання може покращити результати передбачення аварій в порту, але лише за умови достатнього обсягу та якості даних.

Виходячи з представленої статті, можна виділити кілька перспектив розвитку обробки даних з суден та діагностики запобігання аваріям з використанням нейромереж та штучного інтелекту:

1. Автоматичний аналіз поведінки суден:

- Нейронні мережі можуть відігравати ключову роль у розвитку систем, здатних аналізувати поведінку суден у режимі реального часу. Це дозволяє системам автоматично виявляти потенційно небезпечні ситуації та надавати рекомендації для запобігання зіткненням.

2. Класифікація судів та визначення типів:

- Застосування згорткових нейронних мереж для класифікації зображень суден може бути інтегровано до систем автономних суден. Це дозволяє суднам розпізнавати та коректно реагувати на різні типи суден у навколишньому середовищі.

3. Аналіз послідовності дій суден:

- Використання рекурентних нейронних мереж для аналізу послідовності дій суден надає можливість передбачати можливі наслідки цих дій. Це може бути корисним для запобігання аваріям, заснованим на неправильних маневрах або рішеннях екіпажу.

4. Адаптивні системи на основі досвіду:

- Застосування глибокого навчання для створення моделей, здатних навчатися на основі досвіду та покращувати свої рішення з часом, є перспективним напрямом. Це дозволяє системам адаптуватися до умов, що змінюються на морі і забезпечувати більш ефективне і безпечне управління.

5. Прогнозування аварій та безпека в портах:

- Використання методів машинного навчання, включаючи глибоке навчання, для прогнозування ймовірності виникнення аварій в портах може сприяти підвищенню безпеки. Важливо врахувати як поведінку суден, так і інші чинники, такі як погодні умови, течії і навіть людський фактор.

6. Робота з обмеженнями методів машинного навчання:

- Стаття наголошує на необхідності високоякісних даних для навчання моделей глибокого навчання. Робота в цьому напрямку включає розробку методів збору і обробки даних, щоб забезпечити надійність і точність алгоритмів.

7. Робота з обмеженнями даних:

- Розробка методів, які дають змогу ефективно використовувати обмежені дані, оскільки в морських умовах може бути обмежений доступ до високоякісних даних. Це включає методи поліпшення даних і усунення шуму.

Технології доповненої реальності (AR):

Системи AR для навігації: Глибоке навчання може використовуватися в системах доповненої реальності для покращення навігації, надаючи додаткову інформацію про маршрут, об'єкти та умови.

Конференційна стаття [4] визначає розробку системи доповненої реальності для капітанів парусних яхт. У статті описуються експерименти, проведені з досвідченими капітанами, та результати, отримані під час тестування прототипу системи. У системі використовувалося машинне навчання для обробки даних з датчиків і надання капітанам інформації про глибину, напрям і силу вітру. Зокрема, у статті згадується метод виявлення сміття на воді, що базується

на навчанні з учителем. Для цього було використано алгоритм Adaboost ensemble classification, який автоматично вибирає ознаки, встановлює пороги та призначає ваги. У статті також згадується використання кольорових та текстурних орієнтованих ознак, об'єднаних на кількох масштабах у нелінійній манері.

Однак, важливо відзначити, що поточна система розроблена виключно для вітрильних яхт, і її застосування до інших типів суден залишається нез'ясованою. Для того, щоб розширити застосування системи на різних типах суден, можна запропонувати такі кроки:

1. Розширення набору даних:

- Збір та аналіз даних з різних типів суден для більш широкого навчання системи.

2. Адаптація алгоритмів:

- Модифікація алгоритмів машинного навчання для врахування особливостей та вимог різних класів суден.

3. Тестування на різних сценаріях:

- Проведення експериментів та тестування прототипу на різних типах суден для оцінки ефективності та коригування системи.

4. Облік специфіки кожного судна:

- Інтеграція функціональних елементів, які враховують унікальні характеристики кожного типу судна.

5. Масштабованість:

- Розробка системи з урахуванням можливості масштабування для застосування на різних судах.

Застосування глибокого навчання може суттєво покращити алгоритми обробки даних, збільшивши точність та здатність системи адаптуватися до різних умов. Це дозволить перейти від обмеженої застосування капітанам вітрильних яхт до більш універсальної та ефективної системи для різних типів суден.

Навчання та симуляція:

- **Віртуальні тренажери для навчання моряків:** Глибоке навчання може бути задіяне у розробці віртуальних тренажерів, які дозволяють морякам відпрацьовувати навички керування судном у різних умовах без ризику безпеки.

Симуляторне навчання є інтегральною частиною освіти і тренування морських фахівців. В останні роки морські симулятори віртуальної реальності (VR) зробили значний внесок у сучасні методи навчання. Тим не менш, існуючі обмеження в області морських VR-симуляторів включають недостатній педагогічний вплив і відсутність адекватних систем оцінки продуктивності для учнів. У дослідженні [5] представлено засіб оцінки продуктивності, що базується на штучних нейронних мережах (ANN), адаптований з галузі охорони здоров'я на основі огляду літератури. Цей метод може бути впроваджений у морське навчання з метою оцінки продуктивності моряків, що, у свою чергу, сприяє підвищенню педагогічної ефективності морських VR-симуляторів. Розглядаються також існуючі дослідницькі перспективи даної адаптації з урахуванням людських факторів та технічних аспектів морського навчання.

Подальший розвиток досліджень у цій галузі може включати такі аспекти:

- 1. Розширення сфери застосування:** Розробка та тестування систем машинного навчання для різних типів морських суден та спеціалізованих тренувальних сценаріїв.

- 2. Інтеграція з іншими технологіями:** Дослідження можливостей інтеграції машинного навчання з іншими технологіями, такими як доповнена реальність або віртуальна реальність для створення більш комплексних та ефективних тренажерів.

- 3. Удосконалення систем оцінки:** Розвиток більш точних та адаптивних систем оцінки продуктивності, заснованих на машинному навчанні, з урахуванням специфіки тренувальних завдань.

- 4. Навчання з учителем та без вчителя:** Дослідження застосування методів навчання з учителем та без вчителя у контексті тренажерної підготовки для досягнення більш високої гнучкості та ефективності.

5. Облік людського фактора: Дослідження впливу та взаємодії людини з системами машинного навчання у тренувальному середовищі, з урахуванням психологічних та фізіологічних аспектів.

Розвиток цих напрямів досліджень у майбутньому може зробити тренажерну підготовку моряків більш ефективною, а також покращити безпеку та якість навчання у морській індустрії.

Прогнозування та управління:

- **Прогнозування погоди та морських умов:** Глибоке навчання може бути застосоване для більш точного прогнозування погоди та морських умов, що дозволяє судам краще готуватися та вживати відповідних запобіжних заходів.

- **Автоматизоване керування судном:** Розробка систем автоматичного керування, заснованих на глибокому навчанні, може підвищити ефективність судноводіння та безпеку судноплавства.

Стаття [6] описує розробку ефективної моделі прогнозування погоди з урахуванням глибокого навчання. У роботі використовувалися дві різні моделі регресії – MIMO та MISO, а також архітектури LSTM та TCN для обробки тимчасових даних. Експерименти показали, що запропонована модель перевершує існуючі методи машинного навчання та статистичні підходи, динамічний ансамбль і модель WRF. Результати дослідження показали, що використання глибокого навчання може значно покращити точність прогнозування погоди.

В експерименті були використані дані про погоду, зібрані з метеостанцій протягом кількох років. Для навчання моделей використовувалися дані про погоду за попередні кілька годин, а також дані щодо поточних погодних умов. Проведено порівняння запропонованої моделі з декількома іншими методами прогнозування погоди, включаючи класичні методи машинного навчання, статистичні підходи та динамічний ансамбль. Також було проведено порівняння з моделлю WRF, яка є однією із найпоширеніших моделей прогнозування погоди. Результати експерименту показали, що запропонована модель перевершує всі методи прогнозування погоди, що порівнюються, включаючи модель WRF. Більше того, запропонована модель дозволяє досягти високої точності прогнозування погоди на триваліший період часу, до 12 годин вперед. Таким чином, дослідження показало, що використання глибокого навчання може значно покращити точність прогнозування погоди, що може бути корисним для багатьох додатків, включаючи сільське господарство, транспорт та енергетику.

Стаття [7] обговорює загальну концепцію підтримки навігації автономних суден, включаючи різні морські технології та прийняття рішень. У статті також розглядається використання глибокого навчання для створення фреймворку, який може забезпечити автономне керування судном. Однак стаття також обговорює виклики, пов'язані з реалізацією правил міжнародної конвенції щодо запобігання зіткненням суден (COLREGs) для автономних судів.

Система автономного судна складається з кількох модулів, включаючи модуль сприйняття, модуль прийняття рішень та модуль управління. Модуль сприйняття використовує різні технології, такі як системи дистанційного зондування Землі, системи глобального позиціонування (GPS) та системи виявлення перешкод для отримання даних про поточну ситуацію та навколишнє середовище.

Модуль прийняття рішень використовує згорткову нейронну мережу (CNN), яка була навчена на основі даних про поведінку штурмана та інші параметри, такі як швидкість та напрямок руху судна. Цей модуль може приймати рішення на основі даних про поточну ситуацію та поведінку інших суден, а також враховувати загальні правила та обмеження, такі як правила COLREGs.

Модуль керування використовує дані, отримані від модуля прийняття рішень, щоб керувати рухом судна. Цей модуль може керувати швидкістю та напрямом руху судна, а також виконувати інші дії, такі як зміна курсу та зупинка судна.

На основі статті, що описує використання машинного навчання в автономному управлінні судном, можна виділити конкретні напрямки розвитку:

1. Оптимізація алгоритмів глибокого навчання: Проведення додаткових досліджень з метою оптимізації алгоритмів глибокого навчання, що використовуються у модулі прийняття рішень. Це включає поліпшення точності прогнозів, зменшення часу навчання і підвищення загальної ефективності системи.

2. Інтеграція додаткових джерел даних: Розширення списку джерел даних для модуля сприйняття, включаючи сучасні технології, такі як радари, LIDAR та доповнену реальність для більш повного та надійного сприйняття навколишнього середовища судна.

3. Дотримання COLREGs з використанням машинного навчання: Активне дослідження та розробка методів, що дозволяють автономним судам дотримуватись міжнародних правил COLREGs. Це включає розробку інноваційних алгоритмів, здатних адаптуватися до різних ситуацій на морі, з урахуванням правил і обмежень.

4. Створення системи для моніторингу та навчання в реальному часі: Розробка системи, здатної безперервно моніторити роботу модуля прийняття рішень і, при необхідності, коригувати його дії в реальному часі на основі актуальних даних та умов, що змінюються.

5. Тестування та симуляція в різних умовах: Проведення широкомасштабних тестів та симуляцій для перевірки ефективності автономної системи управління у різних морських умовах, включаючи погану погоду, щільний морський рух та аварійні сценарії.

6. Розробка стандартів безпеки: Участь у розробці та впровадженні стандартів безпеки для автономних суден, що включає обов'язкові вимоги до систем управління, процесів навчання та тестування.

7. Навчання системи з урахуванням реального досвіду: Розробка механізмів навчання модуля прийняття рішень з урахуванням реального досвіду експлуатації автономних суден. Це дозволить системі адаптуватися до унікальних ситуацій та підвищувати свою ефективність з часом.

Конкретні кроки у цих напрямках сприятимуть ширшому та успішному впровадженню автономних систем управління судном у морській промисловості.

5. Висновки: Застосування глибокого навчання в контексті судноводіння вимальовує безліч перспектив, що помітно впливають на ефективність та безпеку морського руху. Автоматизоване розпізнавання суден, прогнозування погоди та розвиток систем автоматизованого управління судном, заснованих на глибокому навчанні, надають перспективи зниження ризиків і поліпшення загальної навігаційної безпеки.

Додаткові напрямки розвитку включають обробку даних з бортових сенсорів, де глибоке навчання може значно покращити моніторинг та аналіз даних, а також застосування технологій доповненої реальності для покращення візуального сприйняття та віртуальні тренажери для безпечного навчання моряків.

Необхідність спільної роботи морських інженерів, фахівців з обробки даних та дослідників у галузі штучного інтелекту стає ясною в контексті оптимального розвитку та успішного впровадження даних технологій для покращення ефективності та безпеки морської навігації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Farahnakian, Fahimeh, and Jukka Heikkonen. "Deep learning based multi-modal fusion architectures for maritime vessel detection." *Remote Sensing* 12.16 (2020): 2509.
2. Perera, Lokukaluge P. "Deep learning toward autonomous ship navigation and possible COLREGs failures." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 142.3 (2020): 031102.
3. Kim, Jae Hun, et al. "Machine learning-based models for accident prediction at a Korean container port." *Sustainability* 13.16 (2021): 9137.
4. Wisernig, E., Sadhu, T., Zilinski, C., Wyvill, B., Albu, A. B., & Hoeberechts, M. (2015, October). Augmented reality visualization for sailboats (ARVS). In 2015 International Conference on Cyberworlds (CW) (pp. 61-68). IEEE.
5. Tusher, H. M., Nazir, S., Mallam, S., & Munim, Z. H. (2022, December). *Artificial Neural Network (ANN) for Performance Assessment in Virtual Reality (VR) Simulators: From Surgical to Maritime*

Training. In 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 0334-0338). IEEE.

6. Hewage, P., Trovati, M., Pereira, E., & Behera, A. (2021). Deep learning-based effective fine-grained weather forecasting model. *Pattern Analysis and Applications*, 24(1), 343-366.

7. Perera, L. P. (2018, June). Autonomous ship navigation under deep learning and the challenges in COLREGs. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 51333, p. V11BT12A005). American Society of Mechanical Engineers.

Golikov V. V., Siniuta K.O.

DEEP LEARNING IN THE CONTEXT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MARINE NAVIGATION: DEVELOPMENT PROSPECTS

The article provides an in-depth analysis of the prospects for applying deep learning technologies in the maritime navigation field. It is shown that deep learning enables the automation and significant improvement of processes such as: ship recognition and classification based on visual characteristics, detection of obstacles in the vessel's path, monitoring and analysis of data from onboard sensors, forecasting emergency situations, development of augmented reality systems to enhance navigation, creation of virtual simulators, accurate weather forecasting, automated control of vessel movement.

The literature review demonstrates that deep neural networks can significantly improve the quality of combining images from different sensors for ship detection, analyze large amounts of data from onboard sensors, develop effective augmented reality systems for navigation, create realistic virtual simulators, build accurate weather forecast models, implement automated vessel motion control based on deep learning.

The authors emphasize that further optimization of algorithms for specific tasks, integration of data from additional sensors, development of specialized deep neural network architectures adapted to the maritime environment specifics, as well as thorough testing of systems under real-life conditions, are crucial for successful implementation of deep learning technologies in maritime navigation.

Particular attention should be paid to cybersecurity issues and protection of control systems against hacking. It is also important to develop methods for effective model training on the limited data typical for maritime navigation.

In conclusion, integration of deep learning technologies opens up significant prospects for automation and improving efficiency and safety of maritime transport. Successful implementation requires joint efforts of specialists in artificial intelligence, data processing, marine engineering, and navigation.

Keywords: deep learning, artificial intelligence, maritime navigation, automation, security

Головань А.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОЇ ПРЕСКРИПТИВНОЇ СИСТЕМИ ТА ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

У статті розглянуто важливу проблему формування і дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Проведено аналіз останніх досліджень і публікацій в цій області, які вказують на необхідність розробки нових стратегій та методик управління ефективністю систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Метою дослідження є оцінка та аналіз впливу інтеграції комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Завданням статті є виявлення переваг та можливих обмежень запропонованого підходу, а також на встановлення практичних рекомендацій для покращення процесу технічного обслуговування вантажних суден з використанням сучасних цифрових технологій та прескриптивної теорії рішень. Також розглядається схема взаємозв'язків основних програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна.

Результати статті включають аналіз, який показує, що ухвалення ефективного рішення знижує питомі витрати на 20,9 % у порівнянні з базовою стратегією, при цьому підвищуючи ефективність використання ресурсів на 29,7 %. Висновки підкреслюють важливість аспектів узгодження мети операції технічного обслуговування з критерієм ефективності, а також адаптивність стратегій до змінних умов та потреб. Результати цього дослідження є суттєвими і важливими для галузі водного транспорту та безумовно сприятимуть покращенню безпеки та надійності судноплавства.

Ключові слова: комплексна прескриптивна система, ефективність технічного обслуговування, цифрові стратегії, вантажні судна, підвищення надійності судноплавства, управління експлуатаційними процесами.

Постановка проблеми. У сучасному світі технічне обслуговування вантажних суден стає все складнішим завданням, викликаючи потребу у пошуку нових, більш ефективних підходів до управління цим процесом. Однією з головних проблем у цій галузі є зростаюча складність технічних систем та компонентів, що входять до складу сучасних вантажних суден. Це може включати різноманітність електронних систем, механізмів, систем управління та інші складні технічні складові.

Нагальність проблеми посилюється швидким темпом розвитку технологій, що призводить до появи нових технічних рішень та систем. Це ставить під загрозу традиційні методи технічного обслуговування, які можуть бути недостатньо адаптованими до нових умов.

Ще однією ключовою проблемою є нестабільність технічного стану суден, що може призводити до раптових поломок та аварій, що в свою чергу може становити серйозну загрозу для безпеки екіпажу та довкілля.

Загалом, в сфері технічного обслуговування вантажних суден існує потреба у розробці нових стратегій та методик, які б забезпечували ефективне функціонування суден, зменшували

ймовірність аварій та несправностей, а також оптимізували витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В цілому, аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на актуальність і важливість розробки нових стратегій та методик підвищення ефективності систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден. Важливими постають питання: застосування нових прогностичних стратегій технічного обслуговування із врахуванням загальної вартості впровадження та експлуатації системи прогнозування, яка є інтегральним показником ефективності впровадження проактивної стратегії технічного обслуговування суден [1]; представлення системного підходу з використанням великих даних і машинного навчання як методів створення стратегій прогнозованого технічного обслуговування, яке вже призводить до змін у судноплавній галузі [2]; діяльності суднобудівних верфей повинна бути спрямована на зниження витрат на обслуговування суден за допомогою нових стратегій, заснованих на аналізі показників ефективності [3]; впровадження запропонованих напівкількісних методів є більш надійним підходом для вибору стратегій технічного обслуговування суднових машинних систем [4]. Очікується, що цілісність етапів планування, координації та виконання на борту суден буде добре функціонувати [5]. Оптимальна стратегія технічного обслуговування обирається на основі дванадцяти критичних критеріїв прийняття рішень щодо технічного обслуговування [6]. Відділ технічного обслуговування відіграє важливу роль у підвищенні рівня продуктивності та якості [7]. Гібридний багатокритеріальний метод прийняття рішень підходить для вибору стратегії технічного обслуговування суднових механічних систем та інших супутніх суднових систем [8]. Стратегія динамічного коригування на основі даних застосовується до середовища технічного обслуговування для прогнозованого технічного обслуговування [9]. Впровадження комп'ютеризованої інформаційної системи управління технічним обслуговуванням покращило загальні показники ефективності обладнання та ефективний контроль виробничої системи [10].

Всі ці дослідження разом підкреслюють потенціал розробки нових стратегій та методик управління ефективністю систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Мета дослідження полягає в оцінці та аналізі впливу інтеграції комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Проведене дослідження спрямоване на виявлення переваг та можливих обмежень запропонованого підходу, а також на встановлення практичних рекомендацій для покращення процесу технічного обслуговування вантажних суден з використанням сучасних цифрових технологій та прескриптивної теорії рішень.

Основні результати дослідження. Форми досліджень ефективності технічного обслуговування дуже різноманітні. Мабуть, не може існувати універсальної рецептурної схеми проведення дослідження ефективності операцій технічного обслуговування, що належать навіть до однієї галузі техніки. Однак може виявитися корисним деякий перелік узагальнених положень, дотримуючись якого дослідник організовує свою діяльність під час розв'язання конкретної науково-технічної задачі, розділяючи її на етапи [11]. Далі наведено перелік таких положень, що становить узагальнену схему дослідження ефективності операцій.

I. Проблемний аналіз складається з визначення існування проблеми; виявлення, аналізу і опису ситуації; формування й аналізу проблемної ситуації з використанням евристичних і формальних методів; формування та аналіз альтернативних цілей $\alpha_o = \{A_o^1, A_o^2, \dots, A_o^m\}$, досягнення яких вирішує проблему, і вибір однієї з них як мети операції; аналізу шляхів досягнення мети та визначення суттєвих обмежень (економічних, технічних тощо), що впливають на вибір засобів і способів досягнення мети; декомпозиція складної мети, розчленовування її на складові та завдання; вибір засобів досягнення мети, обґрунтування рівня їхньої якості в низці рівнів якості, що ускладнюється $\pi = \{R, I, C, A, L\}$; оцінка наявних або потрібних ресурсів; загальна постановка задачі дослідження ефективності операції.

II. Концептуальні дослідження складаються з опису метасистеми, аналізу її діяльності; виокремлення S_o -системи, в рамках якої проводиться (реалізується) операція; оцінювання інформаційної достатності; обґрунтування методологічного рівня дослідження ефективності операції $v = \{I, II, III, IV\}$; встановлення типу операції (S_o -системи), виходячи з рівнів поведінки, що ускладнюється $\mu = \{e, h, c, p, a\}$; обґрунтування концепції раціональної поведінки $\gamma = \{P, O, A\}$; висування гіпотез поведінки суб'єктів системи; обґрунтування складу і змісту зовнішнього доповнення, формування необхідного результату операції (цілепокладання), вибір простору стратегій суб'єктів системи технічного обслуговування, встановлення основних обмежень (дисциплінуючих умов), що впливають із діяльності метасистеми; вибір узагальнених показників ефективності, опис результату операції (корисних ефектів і витрат), обґрунтування функції відповідності реального результату необхідному, вибір шкал показників; обґрунтування принципу вироблення концептуального рішення і введення на цій основі критерію ефективності; концептуальне моделювання, кібернетичний опис операції (S_o -системи), факторизація завдання (виявлення ефектів чинників та їхніх взаємодій), встановлення напрямів операційних досліджень, уточнення і конкретизація завдань дослідження ефективності операції.

III. Операціональні дослідження розпочинаються з постановки завдання операціонального дослідження; оцінювання інформаційної достатності; формування (уточнення) множини стратегій за результатами концептуальних досліджень; уточнення характеристик активних засобів, опис їхніх властивостей, оцінка наявних або потрібних ресурсів; вибір способу і засобів операціонального моделювання; формування операціональної моделі, встановлення переліку вихідних даних, введення операторів переходу і виходу, уточнення обмежувальних умов, перевірка операціональної моделі; уточнення показників ефективності операції; обґрунтування принципу вироблення операціональних рішень і формування критерію ефективності; операціональне моделювання, вироблення рекомендацій для ухвалення рішення в різних варіантах завдання дослідження ефективності операції.

IV. Детальні дослідження складаються з постановки задачі детального дослідження; уточнення зовнішнього доповнення за результатами операційного дослідження (вимоги до якості елементів, вимоги до управління якістю тощо); узгодження та вибір показника і критерію оцінки якості операцій системи технічного обслуговування; визначення характеристик якості за результатами експерименту; розв'язання задачі задоволення якості або управління якістю операцій системи технічного обслуговування.

V. Прийняття рішення відбувається за такими кроками: аналіз результатів проведених досліджень; планування контрольних заходів щодо впровадження прийнятого рішення; затвердження прийнятого рішення.

На Рисунку 1 наведено схему основних етапів дослідження ефективності операцій технічного обслуговування і показано зв'язок між ними. Проблемний аналіз безпосередньо не входить у дослідження ефективності операції. Він передує цьому дослідженню, будучи необхідним його початковим етапом. Етап ухвалення рішення має більше організаційний характер, ніж дослідницький, будучи завершальною стадією всієї роботи. Порядок пунктів усередині кожного етапу залежно від конкретного дослідження може бути змінений, а частина пунктів – опущена. Крім того, всередині етапів, а також між етапами можливі цикли, тобто повернення після виконання певних пунктів (етапів) до попередніх пунктів залежно від одержуваних проміжних результатів [12].

З формального погляду на етапі проблемного аналізу реалізується відображення:

$$\alpha_0 \times \pi \rightarrow M_1, \quad (1)$$

де M_1 – множина метасистемних описів певної системи технічного обслуговування.

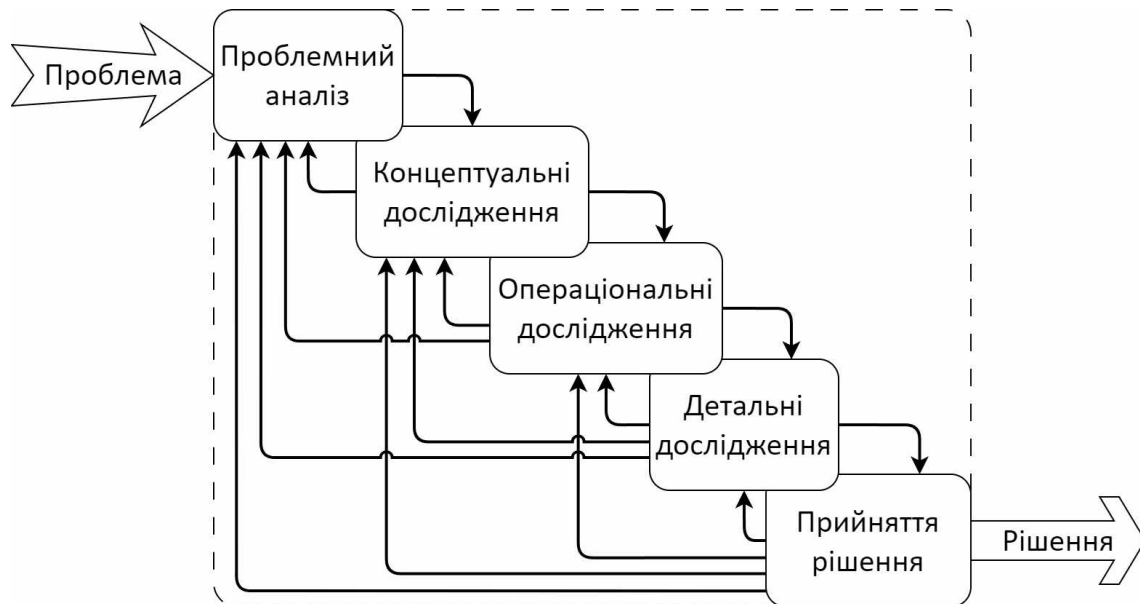


Рисунок 1 – Основні етапи дослідження ефективності операцій

Відображення (1) кожній парі «мета–засіб» її досягнення ставить у відповідність конкретний метасистемний опис галузі системи технічного обслуговування, сукупність засобів якої здатна раціонально розв’язати виявлену проблему.

На етапі концептуальних досліджень реалізується відображення:

$$M_1 \times \mu \times \nu \times \gamma \rightarrow M_2, \quad (2)$$

де M_2 – безліч варіантів зовнішнього доповнення з конкретним описом S_0 -системи, в рамках якої реалізується досліджувана операція.

Операціональне дослідження формально можна представити відображенням:

$$M_2 \times D \rightarrow U^*, \quad (3)$$

де D – множина варіантів вихідних даних задачі вибору раціонального рішення; U^* – множина раціональних рішень за різних варіантів вихідних даних.

Етап прийняття рішення реалізує відображення:

$$U^* \times \sigma \rightarrow U^*, \quad (4)$$

де σ – множина можливих ситуацій, що склалися до моменту ухвалення рішення.

Послідовна реалізація відображень (1) - (4) являє собою формальну схему дослідження ефективності операції технічного обслуговування. Такий формальний підхід становить основу для автоматизації системних досліджень ефективності операцій і загалом систем технічного обслуговування. Наразі практичне застосування такого підходу послідовно реалізовано в автоматичній інформаційній системі формування управлінських рішень (ShipDiMRO) для суден обладнаних інформаційною автоматизованою системою контролю і прогнозування технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (ACMS) [13]. Проте в міру накопичення результатів системних досліджень ефективності операцій і систем технічного обслуговування, систематизації різних підходів до метасистемного опису предметної області ступінь розмитості (нечіткості) відображень (1) - (4) значною мірою знижується. Це відкриває реальний шлях до розв’язання зазначеної проблеми на базі існуючої електронно-обчислювальної системи прескриптивного технічного обслуговування ShipDiMRO і розроблення відповідного математичного забезпечення у вигляді великих проблемно-орієнтованих імітаційних систем.

Критерій ефективності системи технічного обслуговування K є правило, що дає змогу зіставляти стратегії, які характеризуються різним ступенем досягнення мети, і здійснювати спрямований вибір стратегій із множини допустимих.

Критерій ефективності вводиться на основі певної концепції раціональної поведінки.

Існують три концепції раціональної поведінки (вироблення рішень) систем технічного обслуговування: придатності, оптимізації, адаптивізації.

Згідно з концепцією придатності раціональною є будь-яка стратегія u , за якої обраний показник ефективності системи технічного обслуговування набуває значення не нижче деякого прийнятного рівня W^{rq} , тобто:

$$W(u) \geq W^{rq}, u \in U, \quad (5)$$

де U – множина допустимих стратегій.

Якщо показник ефективності векторний, то нерівність (5) записується для кожного часткового показника $W_i(u) \geq W_i^{rq}$, що входить до складу векторного показника ефективності системи технічного обслуговування. Таким чином, рівень забезпечення W^{rq} ділить множину допустимих стратегій U на дві підмножини, що не перетинаються: U^{SAT} – множина прийнятних (пригожих) стратегій і множина неприйнятних стратегій $U \setminus U^{SAT}$. Усі прийнятні стратегії $u \in U^{SAT}$ рівноцінні (однаково задовільні), як і всі неприйнятні стратегії з множини $U \setminus U^{SAT}$ однаково незадовільні. Така концепція призводить до негнучкої та нецілеспрямованої системи дій.

Концепція оптимізації вважає раціональними ті стратегії $u \in U$, які забезпечують максимальний ефект в операції, тобто

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u), \quad (6)$$

Оптимальна стратегія може бути неєдиною, тобто розв'язання задачі (6) може дати безліч рівноцінних оптимальних стратегій $U^* \in U$.

Використовувати концепцію оптимізації можна в тому разі, якщо комплекс умов проведення операції строго фіксований, а показник ефективності $W(u)$ – скаляр. Ця концепція призводить до цілеспрямованої, але не гнучкої системи дій, тому що не враховують поточну інформацію про зміни різного роду, які відбуваються в системі та в зовнішньому середовищі під час реалізації рішення u^* .

Концепція адаптивізації передбачає можливість оперативного реагування під час операції технічного обслуговування на поточну інформацію, що надходить, про зміну комплексу умов проведення операції. Суть концепції адаптивізації полягає у зміні стратегій управління і (стратегію розуміють у ширшому розумінні, вона охоплює як способи зміни параметрів системи технічного обслуговування, так і способи зміни її структури) на основі не тільки апіорної, а й поточної та прогнозної інформації з метою досягнення або збереження певного стану системи в умовах несталого комплексу умов проведення операції.

Множина допустимих стратегій U може видозмінюватися в процесі надходження поточної та прогнозної інформації. Як реакція на інформацію, що надходить, і прогноз розвитку операції система технічного обслуговування може змінювати мету свого функціонування.

У цьому разі згідно з концепцією адаптивізації раціональною слід вважати таку адаптивну стратегію $u(t)$ з множини $U(t, \tau)$, яка забезпечує, наприклад, виконання умови:

$$W_t(u^*(t), \tau) \geq W^{rq}(u(t), \tau), u(t) \in U(t, \tau), \quad (7)$$

де t — час; τ — упередження прогнозу. Запис W_t означає, що показник ефективності може змінюватися в часі.

Концепція адаптивізації призводить до цілеспрямованої та гнучкої логіки дій у системі технічного обслуговування.

У рамках концепції адаптивізації раціональна поведінка системи технічного обслуговування вантажних суден організовується відповідно до таких основних принципів вибору критеріїв ефективності.

1. Принцип селекції. На кожному кроці багатоетапного процесу прийняття рішень цей принцип передбачає добір (селекцію) кількох рішень, близьких до найкращих. Потім із цих рішень слід сформувати низку комбінацій і на наступному етапі ухвалення рішень відібрати кілька комбінацій.

2. Принцип свободи вибору рішень. Цей принцип може бути реалізовано під час організації поведінки систем, здатних до самоорганізації (яким властива *L*-якість). Свобода вибору тут полягає в можливості перегляду, уточнення раніше ухваленого рішення залежно від поточної інформації.

3. Принцип самонавчання. Згідно з цим принципом, адаптивна поведінка системи забезпечується в процесі багаторазових зовнішніх впливів на систему, запам'ятовуванням реакцій на ці впливи і результатів реагування, а також коригуванням реакцій, спрямованим на підвищення ефективності поведінки системи технічного обслуговування. Накопичувану інформацію в процесі самонавчання використовують для вдосконалення критерію ефективності.

4. Принцип прогнозування та аналізу ризиків. Цей принцип вимагає інтеграції аналітичних інструментів для оцінки майбутніх станів системи та потенційних ризиків. Використання моделей прогнозування та аналізу ризиків дає змогу передбачити можливі неполадки та вживати профілактичних заходів до їх виникнення, зменшуючи тим самим ймовірність непередбачених збоїв.

5. Принцип модульності та гнучкості. Цей принцип передбачає створення системи з можливістю легкої адаптації та модифікації її компонентів. Модульність дає змогу швидко й ефективно реагувати на зміни в експлуатаційних вимогах і технологічних процесах, спрощуючи процес обслуговування та модернізації системи.

6. Принцип інтеграції даних і технологій. Цей принцип має містити використання сучасних технологій збирання, оброблення та аналізу даних для поліпшення процесу ухвалення рішень. Інтеграція даних з різних джерел і їх аналіз за допомогою передових предиктивної і прескриптивної аналітики, алгоритмів машинного навчання і штучного інтелекту допоможе підвищити точність і ефективність системи технічного обслуговування.

7. Принцип стійкості та екологічної відповідальності. З огляду на важливість стійкості в сучасному світі, цей принцип підкреслює необхідність мінімізації екологічного впливу системи обслуговування. Включення екологічних критеріїв у процес ухвалення рішень сприяє розробленню більш екологічно чистих та енергоефективних процесів обслуговування.

Поєднання цих принципів дало змогу розробити прескриптивну систему технічного обслуговування, здатну до самонавчання і самостійної адаптації, передбачення і запобігання потенційним проблемам, гнучких реакцій на мінливі умови і потреби, а також удосконалення своїх процесів, забезпечуючи безперервне поліпшення якості та ефективності технічного обслуговування.

Класифікацію критеріїв ефективності наведено на рис. 2. Найважливішим положенням, якого завжди слід дотримуватися під час вибору критерію ефективності операції технічного обслуговування, є узгодження мети операції та критерію ефективності.

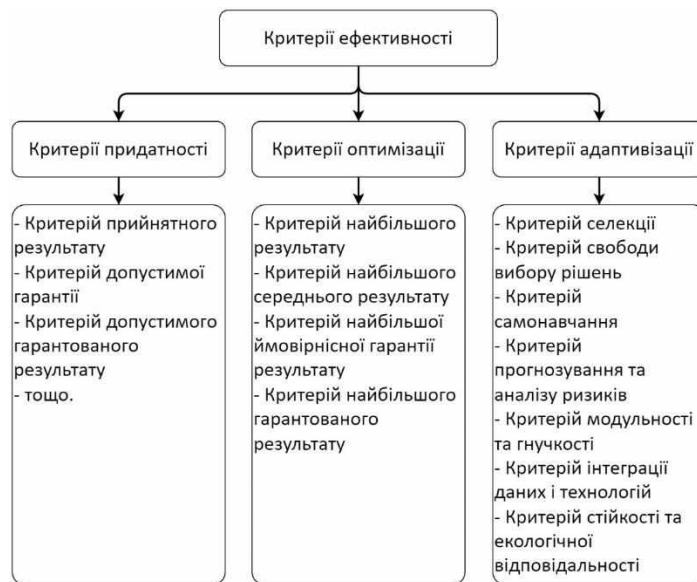


Рисунок 2 – Класифікація критеріїв ефективності

На завершальному етапі формування системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна складаються адаптивні стратегії (плани виконання) різних видів і форм технічного обслуговування. Ці стратегії базуються на визначеному обсязі робіт, наявності кваліфікованого персоналу та матеріально-технічного забезпечення процесу технічного обслуговування вантажного судна. Під час практичної реалізації цих планів прескриптивного технічного обслуговування необхідно проводити їхнє постійне коригування, фіксувати дані про інциденти, прогнозувати потенційні збої та розробляти заходи щодо їх запобігання у майбутньому.



Рисунок 3 – Схема взаємозв'язків основних програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна

На рис. 3 представлена схема взаємодії програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден, що забезпечує управління якістю системи технічного обслуговування для конкретного вантажного судна.

Для дослідження ефективності та співставлення результатів для суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден зручніше користуватися безрозмірними величинами, тобто координатною системою $w(t) - E$ (питомі витрати - ефективність використання ресурсів); графічна інтерпретація розв'язання задачі представлена на Рисунку 4, який ілюструє результати розрахунку представлені у Таблиці 1.

Питомі витрати за цикл $w(t)$ є нормованою величиною, до того ж нормувальний множник для суднових технічних засобів являє собою величину планових витрат за цикл експлуатації, що дорівнює за тривалістю напрацюванню на відмову [14]. Величина E ефективності використання ресурсів, також нормується відповідним нормувальним множником.

Таблиця 1 – Результати розрахунку нормованих показників питомих витрат та ефективності використання ресурсів

Позначення стратегії ТО	Питомі витрати - $w(t)$	Ефективність використання ресурсів - E
A_1	0,4916	0,4887
A_2	0,6245	0,4358
A_3	0,6587	0,6324
A_4	0,3884	0,6952

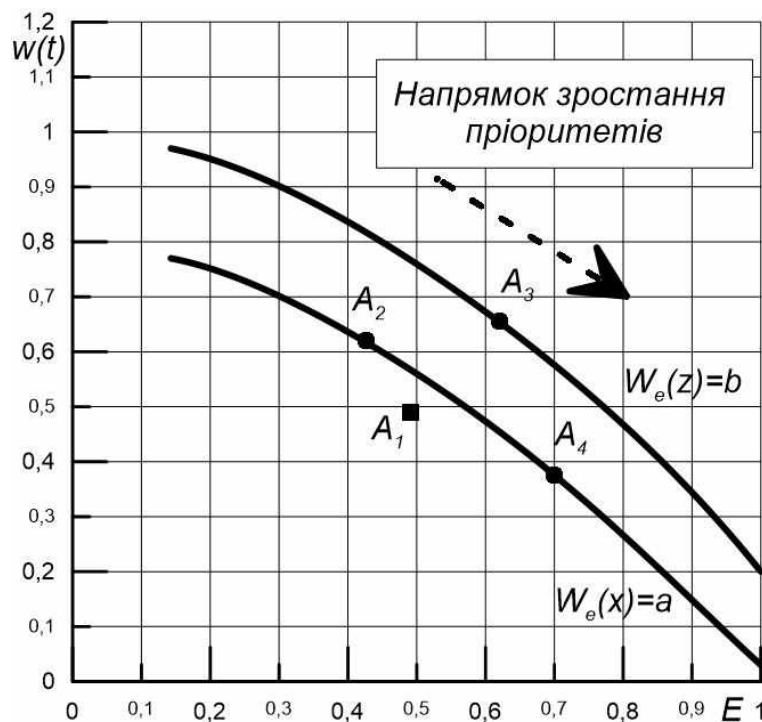


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація результатів вирішення задачі підвищення ефективності

Аналіз Рисунка 4 демонструє, що у порівнянні стратегій $A_2 - A_4$ системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» із стратегією регламентного технічного обслуговування A_1 , найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. Якщо вибирати між рішеннями A_3 і A_4 , то кращим є рішення A_4 , проте необхідно визначити переважання приросту ефективності над приростом

витрат, як про це було сказано вище. При співставленні стратегій A_4 і A_1 відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %.

Для суднових технічних засобів у статті [15] пропонувалося кількісно оцінювати ефективність переходу на технічне обслуговування і ремонт за станом за збереження ймовірності запобігання відмов системою технічного обслуговування. Цей підхід дозволяє оцінювати ефективність переходу не тільки на прескриптивне технічне обслуговування, а також на технічне обслуговування і ремонт за станом, враховуючи одночасні зміни не лише тривалості циклу експлуатації, але й ймовірності запобігання відмов.

Ухвалення ефективного рішення багато в чому залежить від наявності та якості інформації про фактичну надійність та змін у неї, а також про фактичні витрати. Необхідно зазначити, що для того, щоб система комплексного прескриптивного технічного обслуговування наповнилася сучасним змістом, необхідно, щоб вона включала низку додаткових компонентів. До них відносяться:

1. Ідентифікація видів відмов для збереження функцій, які впливають на функціонування;
2. Розташування необхідного обладнання на основі аналізу пріоритетів;
3. Вибір практично застосовних та ефективних завдань технічного обслуговування, які зберігають і відновлюють функції.

Отже, необхідно, щоб система комплексного прескриптивного технічного обслуговування визначала пріоритети відповідно до потреб у технічному обслуговуванні та фокусувала ресурси судна на завданнях, які спрямовані на підвищення надійності судна. В цьому контексті можуть бути рекомендовані критерії оцінки для насичення новим змістом системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування:

1. Які функції та пов'язані з ними необхідні стандарти функціонування судна та його технічних засобів в умовах експлуатації?
2. В яких випадках відмова будь-якого елемента може призвести до втрати ним функцій, функцій технічного засобу і функцій судна?
3. Які є причини кожної функціональної відмови?
4. Які прояви супроводжують кожну відмову (її прояв)?
5. Які наслідки має кожна відмова (її наслідки)?
6. Які заходи слід вжити для передбачення або запобігання кожній відмові (профілактичні завдання, їх перелік, локації та терміни виконання)?
7. Якщо відповідне профілактичне завдання неможливо знайти (не можна виконати необхідні дії), то яким чином слід діяти?

Таким чином створення сучасної системи технічного обслуговування починається з визначення переліку функцій, які необхідно забезпечити. З урахуванням того, що ці функції мають бути розподілені за пріоритетом відповідно до наслідків втрати функціонування, з одного боку, необхідний збір фактичної інформації про наслідки відмов, а з іншого - має існувати можливість зміни пріоритету функцій самим обслуговуючим персоналом.

Говорячи про обсяг оперативної інформації, варто зазначити, що він безумовно збільшиться. Однак сама система технічного обслуговування охоплює фактично всі компоненти системи діагностики та прийняття рішень. Це скоротить час на пошук несправностей і зменшить кількість помилок, зокрема в складних об'єктах.

Висновки. З урахуванням вище зазначених розроблених методик та структур систем моніторингу, можна сформулювати такі висновки:

1. Сформовано підхід до розробки комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування вантажних суден. Використання такої системи дозволяє підвищити якість обслуговування та зменшити витрати на технічне утримання суден.

2. Аналіз результатів показує, що ухвалення ефективного рішення знижує питомі витрати на 20,9% у порівнянні з базовою стратегією, при цьому підвищуючи ефективність використання ресурсів на 29,7%. Важливими аспектами є узгодження мети операції технічного

обслуговування з критерієм ефективності, а також адаптивність стратегій до змінних умов та потреб.

3. Сучасна система технічного обслуговування має включати додаткові компоненти, такі як ідентифікація видів відмов та аналіз пріоритетів розташування обладнання. Побудова такої системи починається зі збору інформації про функції та їхні пріоритети, а також з можливості зміни пріоритетів в майбутньому.

Результати цього дослідження є суттєвими і важливими для галузі водного транспорту та сприятимуть покращенню безпеки та надійності судноплавства. У цілому, стаття надає поглиблене розуміння шляхів розвитку і впровадження системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден і відмічає, важливість цих кроків у напрямку підвищення надійності та ефективності морського транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lazakis, I., Turan, O., & Aksu, S. (2010). Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*, 5(4), 337–357. <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>
2. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
3. Manea, E., Militaru, C., Remus, Z., & Chițu, M.G. (2015). Improving Organizational Performance Through the Application of Integrated Management Systems in Maintenance Activities in the Shipyards. *Constanta Maritime University Annals*, 24.
4. Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
5. Kandemir, C., & Çelik, M. (2017). Determining shipboard integration requirements of maintenance 4.0 concept in marine engineering. *Journal of Business, Economics and Finance*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.17261/pressacademia.2017.568>
6. Emovon, I. (2016). Ship system Maintenance Strategy selection based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology. *World Journal of Engineering and Technology*, 04(02), 252–260. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.42024>
7. Finch, B. J., & Gilbert, J. P. (1986). Developing maintenance craft labor efficiency through an integrated planning and control system: A prescriptive model. *Journal of Operations Management*, 6(3–4), 449–459. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0272-6963(86)90016-1)
8. Emovon, I., Norman, R., & Murphy, A. J. (2015). Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>
9. Mi, S., Feng, Y., Zheng, H., Li, Z., Gao, Y., & Tan, J. (2020). Integrated Intelligent Green Scheduling of Predictive Maintenance for Complex Equipment based on Information Services. *IEEE Access*, 8, 45797–45812. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977667>
10. Šlaichová, E., & Marsikova, K. (2013). The effect of implementing a maintenance information system on the efficiency of production facilities. *Journal of Competitiveness*, 5(3), 60–75. <https://doi.org/10.7441/joc.2013.03.05>
11. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>
12. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid

- Battery Maintenance,” SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>
13. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 077 – 084. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>
14. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskiy, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In *Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37
15. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conference Series*, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>

REFERENCES

1. Lazakis, I., Turan, O., & Aksu, S. (2010). Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*, 5(4), 337–357. <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>
2. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
3. Manea, E., Militaru, C., Remus, Z., & Chițu, M.G. (2015). Improving Organizational Performance Through the Application of Integrated Management Systems in Maintenance Activities in the Shipyards. *Constanta Maritime University Annals*, 24.
4. Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
5. Kandemir, C., & Çelik, M. (2017). Determining shipboard integration requirements of maintenance 4.0 concept in marine engineering. *Journal of Business, Economics and Finance*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.17261/pressacademia.2017.568>
6. Emovon, I. (2016). Ship system Maintenance Strategy selection based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology. *World Journal of Engineering and Technology*, 04(02), 252–260. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.42024>
7. Finch, B. J., & Gilbert, J. P. (1986). Developing maintenance craft labor efficiency through an integrated planning and control system: A prescriptive model. *Journal of Operations Management*, 6(3–4), 449–459. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0272-6963(86)90016-1)
8. Emovon, I., Norman, R., & Murphy, A. J. (2015). Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>
9. Mi, S., Feng, Y., Zheng, H., Li, Z., Gao, Y., & Tan, J. (2020). Integrated Intelligent Green Scheduling of Predictive Maintenance for Complex Equipment based on Information Services. *IEEE Access*, 8, 45797–45812. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977667>
10. Šlaichová, E., & Marsikova, K. (2013). The effect of implementing a maintenance information system on the efficiency of production facilities. *Journal of Competitiveness*, 5(3), 60–75. <https://doi.org/10.7441/joc.2013.03.05>
11. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>
12. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid

- Battery Maintenance,” SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>
13. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (5), 077 – 084. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>
14. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37
15. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. IOP Conference Series, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>

Golovan A.I.

IMPACT OF A COMPLEX PRESCRIPTIVE SYSTEM AND DIGITAL STRATEGIES ON THE EFFICIENCY OF THE CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEM

The article addresses the important issue of forming and studying the impact of an integrated prescriptive system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system. The author analyzes recent research and publications in this area, which indicate the need to develop new strategies and methods for managing the efficiency of maintenance systems and implement them in the operation of cargo ships to improve the efficiency of cargo ship maintenance systems.

The purpose of the study is to evaluate and analyze the impact of integrating a complex prescriptive maintenance system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system. The objective of the article is to identify the advantages and possible limitations of the proposed approach, as well as to establish practical recommendations for improving the process of cargo ship maintenance using modern digital technologies and prescriptive decision theory. The article also considers the scheme of interconnections of the main program modules of the "Integrated Prescriptive Maintenance" system for cargo ships in the quality management of the cargo ship maintenance system.

The results of the article include an analysis that shows that making an effective decision reduces unit costs by 20.9% compared to the baseline strategy, while increasing the efficiency of resource use by 29.7%. The findings emphasize the importance of aligning the goal of the maintenance operation with the performance criterion, as well as the adaptability of strategies to changing conditions and needs. The results of this study are significant and important for the water transport industry and will certainly contribute to improving the safety and reliability of shipping.

Keywords: *integrated prescriptive system, maintenance efficiency, digital strategies, cargo ships, improving shipping reliability, operational process management.*

Врублевський Р.Є., Дзигар А.К., Сатулов А.І., Волкова А.С.

ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ NO_x ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЮ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ПРИГОТОВЛЕНОЇ РОЗРОБЛЕНИМ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНИМ АПАРАТОМ

Морські судна з дизельними двигунами повинні відповідати постанові 13 Додатка VI MARPOL IMO і Технічному Коду 2008 NO_x . Міжнародний Сертифікат запобігання забруднення повітря (сертифікат EIAPP) потрібен для кожного двигуна. Незалежно від того, яка технологія використовується для виконання вимог, ті ж вимоги тестування й обмеження емісії NO_x повинні бути застосовані. Сертифікат EIAPP є доказом, що система двигуна, включаючи технологію скорочення емісії NO_x є відповідною. Одним із методів первинного зниження викидів NO_x судновими дизелями є використання водно-паливної емульсії (ВПЕ), де вода у вигляді найдрібніших крапель розподілена в паливі, а її вміст відповідає не більше 20 % до об'єму палива.

У статті проведено аналіз вибору апарату для приготування водно-паливної емульсії.

Для досягнення цілей дослідження вибрано роторно-пульсаційний апарат з пристроєм дозування та подачі води.

В процесі підготовки матеріалів до публікації описано конструкцію розробленого роторно-пульсаційного апарату, приведено схему цієї установки та схему модернізації паливної системи із розробленою установкою для приготування водно-паливної емульсії. Також в процесі досліджень розроблено установку із цим спроектованим роторно-пульсаційним апаратом та лабораторним дизель-генератором, який працює на двигуні Д-246.2.

У ході випробувань розробленого роторно-пульсаційного апарату на лабораторному дизель-генераторі з двигуном Д-246, при роботі його на водо-паливній емульсії приготовленої за допомогою вищевказаного апарату та на паливі без додавання води, було виявлено зниження вмісту оксидів азоту NO_x у порівнянні з паливом без вмісту води, що й свідчить про працездатність розробленого роторно-пульсаційного апарату.

Також досліджено якість та стійкість приготовленої водо-паливної емульсії розробленим роторно-пульсаційним апаратом та апаратом без дозованого пристрою.

У висновку всіх виконаних досліджень можна стверджувати, що розроблений роторно-пульсаційний апарат, виконує покладені на нього функції, та може використовуватися для зниження викидів оксидів азоту NO_x на судах.

Ключові слова: водно-паливна емульсія; роторно-пульсаційний апарат; паливо; викиди NO_x ; судновий дизель; диспергатори; модернізація паливної системи.

Вступ. Викиди оксидів азоту (NO_x) з суднових двигунів на глобальному рівні є суттєвими. Сполуки NO_x беруть участь в утворенні фотохімічного смогу і кислотних дощів. Водний транспорт має значний вплив на якість повітря, особливо поблизу жвавих прибережних водних шляхів. Викиди оксидів азоту у повітрі перебувають від 1 до 3 днів, що може означати, що вони транспортуються на відстань від 400 до 1200 км.

Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла конвенцію з контролю забруднення повітря з суден (MARPOL, Додаток VI). Двигун повинен відповідати певним обмеженням по емісії NO_x при роботі на тестовому режимі та повинен бути сертифікований відповідно до Технічного кодексу. Перед виробниками суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) поставлено завдання обмежити викиди NO_x без суттєвого збільшення витрати палива і димності відпрацьованих газів. Більшість виробників СДВЗ може задовольнити обмеження ІМО Tier II

використовуючи конструктивні зміни двигуна. Вони включають в себе підвищений тиск стиснення в поєднанні з пізніми фазами упорскування, збільшення інтенсивності уприскування, оптимізовані закони розпилювання палива, оптимізовані форми камери згоряння, зниження температури повітряного заряду з електронним управлінням впорскування палива і змінними фазами газорозподілу. Більші скорочення меж, що встановлено вимогами ІМО Tier III, вимагають застосування альтернативних способів, як використання водопаливних емульсій або обробки відпрацьованих газів.

Постановка проблеми. Перехід від рівня обмеження NO_x Tier II до Tier III, як визначено в постанові 13 Додатка VI MARPOL ІМО, емісія NO_x повинна бути скорочена приблизно на 75 %. Це означає, що конструктивних змін двигуна недостатньо. Кілька технологій або комбінація технологій, можуть скоротити емісію до Рівня III. Цей список є вибором можливих технологій:

- двопаливні двигуни (DF) / газові двигуни;
- селективне каталітичне очищення (SCR);
- рециркуляція випускних газів (EGR);
- батареї/гібрид. Також у комбінації з технологіями скорочення NO_x ;
- паливні елементи/паливні елементи гібридних систем. Також у комбінації з технологіями скорочення NO_x , сертифіковані на Рівень III.

Морські судна з дизельними двигунами повинні відповідати постанові 13 Додатка VI MARPOL ІМО і Технічному Коду 2008 NO_x . Міжнародний Сертифікат запобігання забруднення повітря (сертифікат EIAPP) потрібен для кожного двигуна. Незалежно від того, яка технологія використовується для виконання вимог, ті ж вимоги тестування й обмеження емісії NO_x повинні бути застосовані. Сертифікат EIAPP є доказом, що система двигуна, включаючи технологію скорочення емісії NO_x є відповідною.

Одним із методів первинного зниження викидів NO_x судновими дизелями є використання водно-паливної емульсії (ВПЕ), де вода у вигляді найдрібніших крапель розподілена в паливі, а її вміст відповідає не більше 20 % до об'єму палива. При упорскуванні суміші додаткове тепло, необхідне для нагріву рідкої води до температури кипіння, сам випар, а також перегрівання водяної пари значно знижують температуру згорання і, отже, утворення NO_x . Попередній досвід вчених показує, що, як правило, викид NO_x знижується приблизно на 1 % на 1 % води, що присутня в суміші (у перерахунку на загальну масу). Тому актуальною задачею стає розробка апаратів для якісного приготування стабільної ВПЕ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує багато способів та пристроїв для приготування ВПЕ. Із досліджень [1–20] можна зробити висновок, що в статичних апаратах перемішування відбувається при мінімальних витратах енергії, а на апаратах роторно-пульсаційного типу досягається висока якість емульсії, що готується, при значно менших енерговитратах у порівнянні з іншими типами диспергаторів (рис. 1). Тому, навіть у типовій конструкції роторно-пульсаційного апарату (РПА), на оброблювану ВПЕ виявляється фізична дія, обумовлена сукупністю великого числа чинників, що інтенсифікують технологічний процес перемішування.

Виходячи з вищевикладеного, для приготування ВПЕ на першому етапі доцільно використати статичний апарат (дозатор-змішувач), який не вимагає додаткового приводу, а на другому етапі – роторно-пульсаційний апарат із приводом від струменя палива. Ці пристрої повинні мати малі габарити і об'єм, а також високу надійність.

Проведемо аналіз конструкцій роторно-пульсаційних апаратів для приготування водно-дизельної суміші.

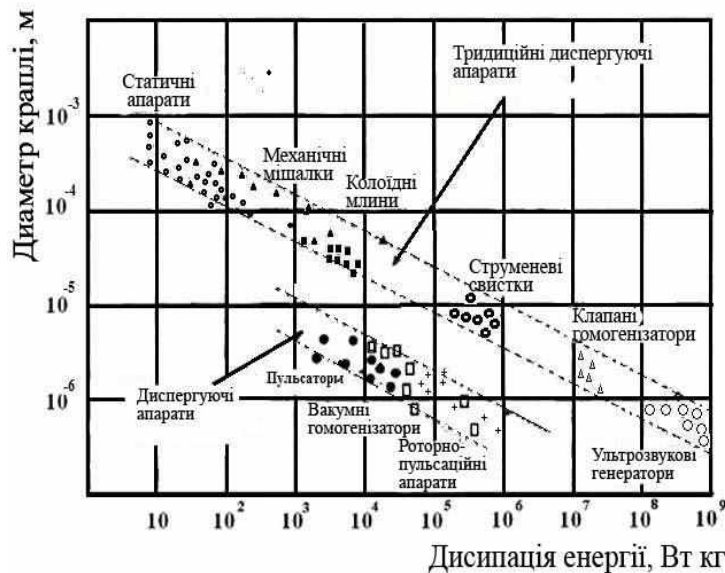


Рисунок 1 – Результати порівняння різних видів диспергаторів

Загальний вигляд найбільш перспективних роторно-пульсацийних апаратів показаний на рис. 2 та рис. 3 [8–15].

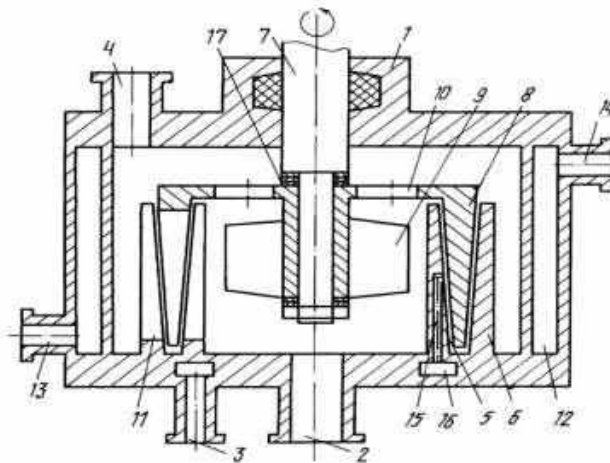


Рисунок 2 – Загальний вигляд роторно-пульсацийного апарата: 1 – корпус; 2, 3 – впускний патрубок; 4 – випускний патрубок; 5, 6 – кільця статора; 7 – вал; 8 – ротор; 9 – лопаті; 10 – отвори; 11 – коаксіальні конуси з прорізами; 12 – сорочка; 13, 14 – штуцери; 15 – канали; 16 – камера; 17 – регулювальна шайба

Проведений аналіз технічних засобів (пристроїв), що застосовуються для поліпшення експлуатаційних і екологічних показників СДВЗ показав, що найбільш раціональними є такі пристрої, які здатні впливати на робочий процес двигуна шляхом заміни дизельного палива на ВПЕ, що дозволяють мінімізувати фінансові витрати на модернізацію СДВЗ і організацію приготування ВПЕ.

Цим вимогам повною мірою задовольняє спосіб часткової заміни палива водою, що має теплоту випару майже в 8 разів вище, ніж у дизельного палива. При раціональному складі суміші падіння температури за рахунок випару води у ВПЕ відбувається більш ніж у 10 разів у порівнянні з паливо-повітряними сумішами, що забезпечує найкраще сумішоутворення в камері

згорання дизеля. При приготуванні ВПЕ доцільно перемішувати воду з паливом безпосередньо перед поданням у циліндри, що дозволить відмовитися від використання дорогих емульгаторів. Застосування такої ВПЕ може поліпшити експлуатаційні і екологічні показники СДВЗ.

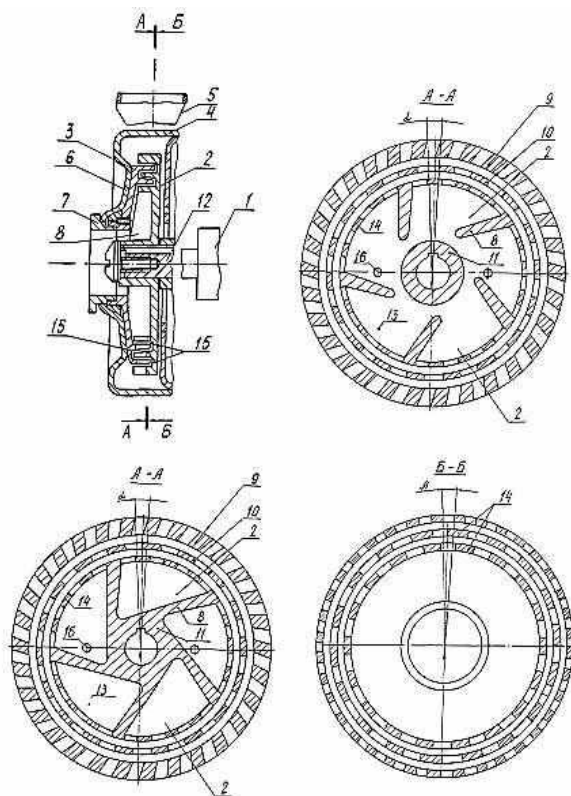


Рисунок 3 – Загальний вигляд і в розрізі по перерізах РПА: 1 – привід; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – випускний патрубок; 6 – кришка; 7 – впускний патрубок; 8 – вхідні лопатки насоса; 9 – вихідні лопатки насоса; 10, 14 – зубчастий елемент; 11 – маточина; 12 – вал; 13 – камера; 15 – кільцеві канавки; 16 – розвантажувальні отвори

На підставі проведеного експериментального дослідження [12] впливу концентрації води на експлуатаційні показники СДВЗ встановлено, що раціональне співвідношення води по відношенню до об'єму палива становить 17...20 %. При цьому основні характеристики двигуна істотно не змінюються. Крім того, введення води інтенсифікує процес горіння допалюванням сажі за рахунок гідроксильного радикала (ОН), який також потрібний для горіння оксиду вуглецю (СО) (особливо при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \leq 1$) і перекладі його у вуглекислий газ (СО₂) [12].

Зміст у ВПЕ 17...20 % водного компонента істотно не змінюватиме хід хімічних реакцій, які активізують корозію металів, оскільки при нормальній експлуатації з відносною вологістю повітря 40...60 % в циліндр СДВЗ і так поступає не менше 10...20 % водяної пари від маси палива. Отримання ВПЕ, де компонентами є дві взаємно не змішувані рідини (вода і паливо), необхідно здійснювати в два етапи: перший етап – приготування «грубої» ВПЕ, у якій середній діаметр крапель води не перевищує 50 мкм; другий етап – приготування «тонкої» ВПЕ, у якій середній діаметр крапель водної фази складає близько 2 мкм.

Для приготування «грубої» ВПЕ доцільно використати апарат ежекційного принципу дії, який поєднує в собі функції дозатора і змішувача, оскільки при його використанні не потрібно додаткового приводу, а процес змішування здійснюється в результаті подання компонента, що дозується, в основний потік за рахунок різниці тисків, що створюється вставкою-дифузоров. Для приготування «тонкої» ВПЕ необхідно використати РПА з виготовленням у його статорі двох рядів отворів, які сприятимуть збільшенню продуктивності апарату. Додатково треба

виготовити невелику кількість отворів і в роторі, яких буде досить для модуляції потоку оброблюваної рідини в каналах статора. Підвищення продуктивності РПА може бути досягнуте за рахунок використання багаторядної конструкції ротора і статора.

Пристрої, що готують водно-паливну емульсію, із заздалегідь підібраним оптимальним складом води і палива. Принципова схема приготування ВПЕ з елементами регулювання компонентів, що входять до її складу, представлено в роботі [1] і показано на рис. 5.

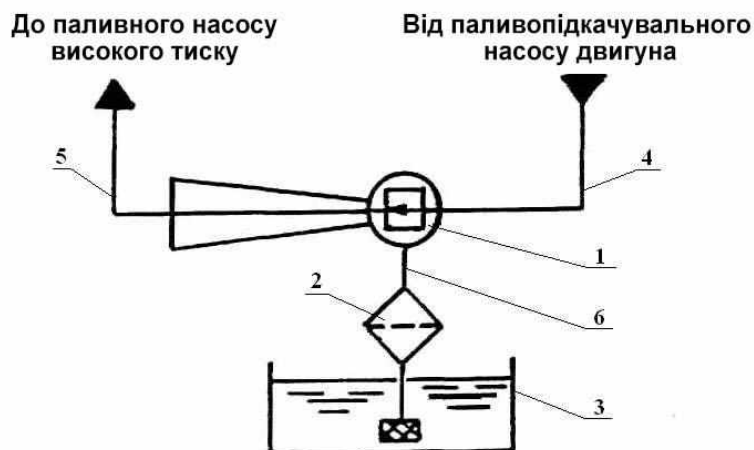


Рисунок 5 – Схема пристрою для подання води в дизельний ДВЗ

Цей пристрій (рис. 5) готує ВПЕ в системі живлення дизельного ДВЗ і складається з фільтра 2 для води, ежектора зі всмоктуючою склянкою 1, сполученою з місткістю для води.

Схема ежектора струминної кавітації показана на рис. 6 він складається з шестерні 10, зубчастої рейки 11, приводу зубчастої рейки 12, всмоктуючої склянки 14. Активне сопло може переміщатися уздовж корпусу ежектора і сполученого з ним різьбовим з'єднанням. Застосування такої конструкції дозволяє змінювати площу контакту різнорідних рідин у камері змішувача ежектора і управляти якістю ВПЕ, що готується, залежно від кількості водного компонента, що подається, та поступає для перемішування в камеру змішувача.

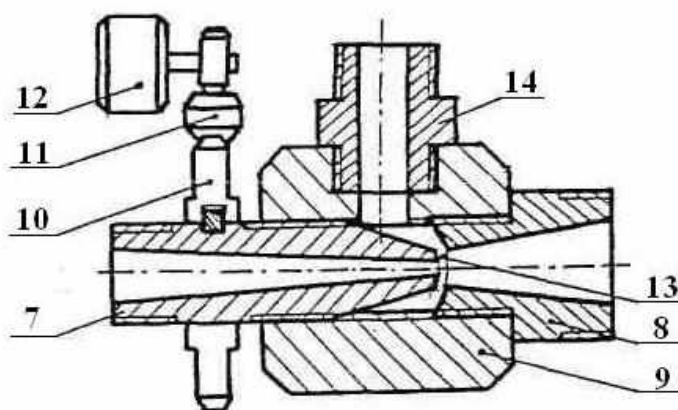


Рисунок 6 – Схема ежектора струминної кавітації

Експлуатаційні властивості ВПЕ, такі як щільність, в'язкість, температура застигання, температура спалаху, стійкість до розшарування залежать від змісту водного компонента, а також середніх розмірів крапель води (дисперсності). У ежекторах струминних кавітацій ці

величини є функцією тиску нагнітання палива в активному соплі та площі контакту води і палива, які визначаються площею перерізу робочої порожнини дифузора.

При роботі дизеля регулювання якості суміші, що готується, із застосуванням цього пристрою може робитися різними способами (вручну, гідроприводом, електроприводом) залежно від конструктивних особливостей його системи живлення. За результатами експериментального дослідження впливу відсоткового вмісту водного компонента на роботу дизельної силової установки встановлено, що із зростанням кількості водного компонента у водно-паливній суміші спостерігається лінійне зростання періоду затримки займання і відбувається зменшення шкідливих викидів NO_x на 30...40 % і сажі на 60 %. Вміст води склав 9...10 % відносно до об'єму палива.

Формулювання цілей статті. Розробка конструкції пристрою для приготування водно-паливної емульсії СДВЗ, що направлено на зниження викидів NO_x до рівня обмежень згідно IMO Tier III.

Основні результати дослідження. Спираючись на аналіз різних апаратів та систем для приготування ВПЕ, автором для подальших наукових та практичних досліджень був вибраний роторно-пульсаційний апарат. В ході практичних та наукових досліджень була розроблена конструкція РПА, яка зображена на рис. 7. Дослідження показали, що поєднання двох апаратів: дозуючого воду та самого РПА дає максимальну ефективність при приготуванні ВПЕ. Завданням будь-якого пристрою для приготування ВПЕ – приготувати однорідний состав емульсії, яка має оптимальний діаметр крапель води. Оптимальний діаметр крапель води складає 5...10 мкм [4], при цьому розмірі крапель вода буде однорідно диспергувати в паливі в стабільну емульсію. Такий розмір крапель води дозволить їм краще диспергувати в паливі та довший час зберігати стабільність емульсії. Тобто більший час від процесу стабільної емульсії до процесу флокуляції (об'єднання крапель меншим діаметром у більші глобули води). Процес флокуляції та неоднорідність не допустимий для ВПЕ так як може призвести до корозії паливної апаратури, тому збільшення часу між цими двома процесами і є найголовнішим завданням при створенні апаратів для приготування емульсії.

Розроблений автором РПА (рис. 7) дозволяє вирішити завдання збільшення часу між двома процесами: стабільної емульсії та флокуляції, при приготуванні ВПЕ. Це досягається об'єднанням двох апаратів: дозатора води та РПА. Дозатор води подає воду в паливо краплями діаметром 5 мкм, це досягається тим що в трубі дозатора 6 (рис. 7) просвердлено отвори на відстані один від одного по всій поверхні труби. Таке розташування отворів дозволить утворюватися каплі води та зриватися з поверхні труби дозатору і при цьому не об'єднуватися в більш-більші каплі та однорідно диспергувати у паливі. У існуючих апаратах для приготування ВПЕ вода подається не так дозовано, і краплі які вона утворює в паливі утворюються більшого діаметру, що зменшує час переходу до процесу флокуляції. А в деяких апаратах зовсім не якої дозованості немає, вода просто подається в зону апарату РПА.

Принцип роботи розробленого РПА (рис. 7) полягає в тому що вода яка подається до ємності дозатору через вхід 5, проходить скрізь отвори в трубі дозатору 6 утворюючи краплі певного діаметру. Краплі води які утворилися зриваються паливом яке надходить через впускний патрубок 4. Потім утворена емульсія надходить до ротору 1 який має вигляд диску з круговими елементами у вигляді зубців в яких просвердлені отвори для проходу та перемішування ВПЕ. Емульсія потрапляє на лопатки ротору 1 які перенаправляють її до статору 2, який також у вигляді диска з круговими зубцями в яких просвердлені отвори. Коли емульсія проходить між статором та ротором відбувається перемішування води с паливом до однорідної емульсії. Приготовлена ВПЕ потрапляє до впускного патрубка 3 де далі йде в систему паливоподачі. Таким чином у розробленому РПА, об'єднуються два апарати: апарат дозованої подачі води та сам розроблений РПА. Це об'єднання дозволить подати воду до апарату дозовано та її перемішати, що в свою чергу впливатиме на якість приготовленої ВПЕ

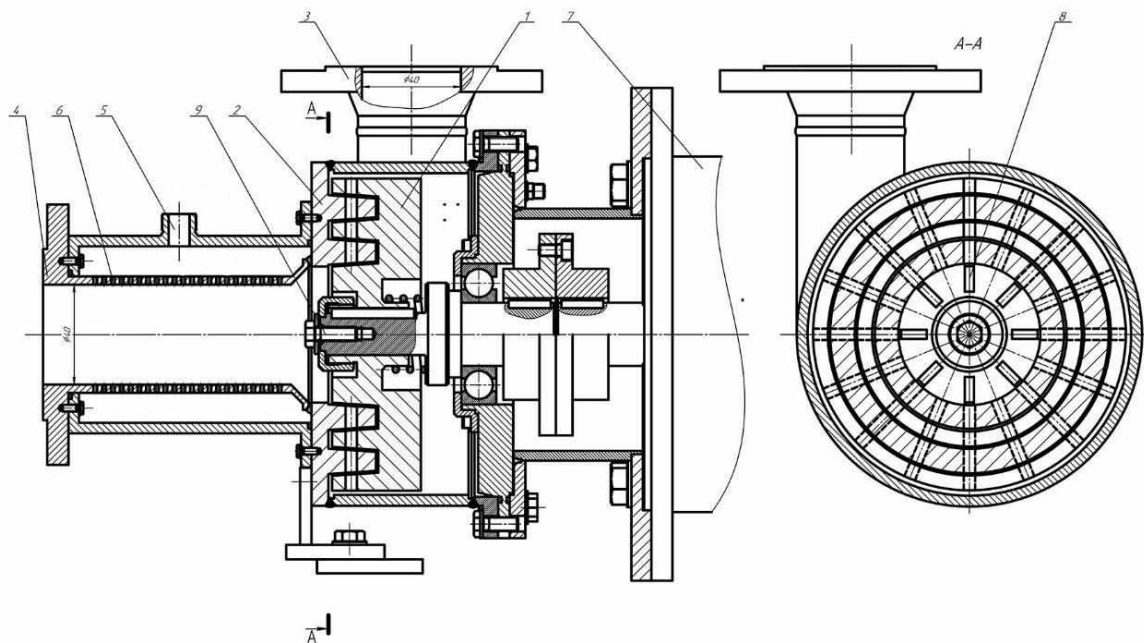


Рисунок 7 – Розроблений роторно-пульсаційний апарат із дозуючим пристроєм для приготування ВПЕ [16]

Стабільна та однорідна ВПЕ отримується після приготування в розробленому РПА завдяки процесу гідродинамічної кавітації – утворенню в емульсії порожнеч з розчиненими в ній газами. Після ударно-хвильових дій, які утворює розроблений апарат, порожнечі з газом в ВПЕ виникають між ротором та статором при обтіканні та ударом емульсією о них. Порожнечі з газом які утворилися в ВПЕ розпадаються на найдрібніші кавітаційні бульбашки, які потім лопаються та таким чином руйнують асфальтено-смолисті речовини в паливі.

Для регулювання різноманітних параметрів ударно-хвильових дій на ВПЕ використовується: 1) зазор між статором та ротором, який регулюється за допомоги регулювального гвинта 9 (рис.7) – впливає на розмір кавітаційних бульбашок та тиск ударних хвиль які утворює апарат на ВПЕ; 2) число рядів зубців які мають статор та ротор розроблювального апарату – впливає на загальний час ударно-хвильових дій на оброблювальну ВПЕ. Дана конструкція спроектованого РПА здатна забезпечити при обробці ВПЕ стабільну та однорідну емульсію в якій в'язкість не буде перевищувати в'язкості палива. Отримана в результаті емульсія буде складатися з найменших часок елементів які в неї входять що в свою чергу призведе до ефективного згоряння її та зниження шкідливих викидів відпрацьованих газів які забруднюють навколишнє середовище. Також емульсія отримана після обробки розробленим апаратом набагато збільшує час переходу від фази стабільної емульсії до фази флокуляції, що в свою чергу забезпечить роботу паливної апаратури з ВПЕ без шкоди для неї.

Дослідження впливу апарату на оброблювану ВПЕ показали:

1. Якщо зменшити кількість круглих рядів з зубцями одночасно у ротора та статора спостерігається зниження стабільності оброблювальної ВПЕ.

2. Якщо збільшити кількість круглих рядів з зубцями одночасно у ротора та статора витрата енергії на процес обробки суттєво збільшується.

3. Якщо при регулюванні зменшити зазор між ротором та статором до 0,3 мм, спостерігається різке зростання тиску ударних хвиль при лопанні кавітаційних бульбашок це призводить до збільшення подрібнення асфальтено-смолистих речовин та інших компонентів ВПЕ. Дуже високе подрібнення негативно впливає на в'язкість отриманої ВПЕ тому що менша частина асфальтено-смолистих речовин осідають на поверхні глобул води. Для протікання кращого процесу горіння необхідно щоб найбільша кількість асфальтено-смолистих речовин осідало на поверхні глобул води. Вода є найкращий чим повітря окисник для асфальтено-

смолистих речовин тому при згоранні ПВЕ де найбільша кількість асфальтено-смолистих речовин осіло на поверхні глобул води вони будуть максимально швидко згорати;

4. Якщо при регулюванні збільшити зазор між ротором та статором до 0,9 мм суттєво знижується подрібнення асфальтено-смолистих речовин та збільшення глобул води це негативно впливає на стабільність приготовленої ВПЕ та погіршує процес горіння суміші.

В подальших дослідженнях було розроблено установку з спроектованим апаратом РПА та лабораторним дизель-генератором з двигуном Д-246.2. На рис. 8 схематично зображено розроблене устаткування для приготування якісної ВПЕ. Устаткування складається з двох гілок: води та палива.

Принцип роботи устаткування (рис. 8):

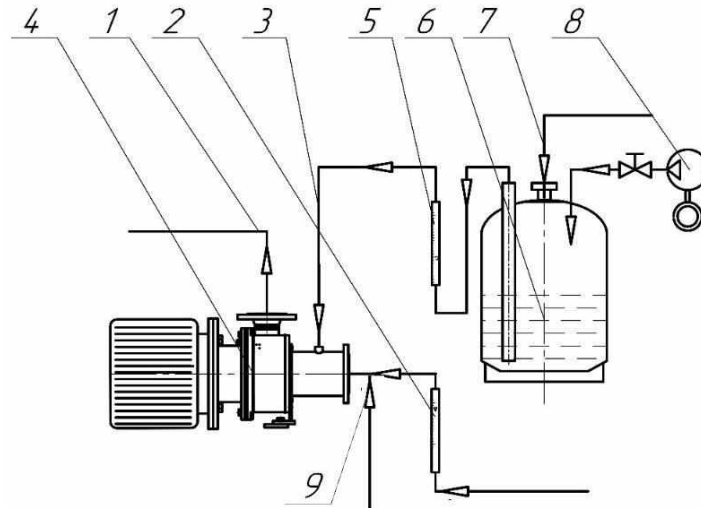


Рисунок 8 – Схема установки приготування ВПЕ [16]: 1 – вихід ВПЕ; 2 – ротамер для палива; 3 – вхід води до РПА; 4 – розроблений РПА; 5 – ротамер для води; 6 – бак для води; 7 – трубопровід із водою; 8 – компресор; 9 – місце додавання емульгатора

– гілка води: вода подається до баку 6 по трубопроводу 7. Компресор 8 слугує для нагнітання повітря в бак 6. Повітря яке було подане в бак 6 спричиняє тиск на воду що знаходиться в баку 6. Вода під тиском повітря рухається в напрямку ротамеру 5. Ротамер потрібен для визначення кількості витраченої води за одиницю часу. Далі вода потрапляє до розробленого РПА 4.

– гілка палива: паливо, з емульгатором, надходить по трубопроводу до ротамера 2. Ротамер 2 потрібен для визначення кількості витраченого палива за одиницю часу. З ротамеру паливо потрапляє до розробленого РПА в якому і відбувається змішення палива та води в ВПЕ. Регулюванням подаванням води, регулюється кількісний її вміст в паливі.

На рис. 9 можна побачити схему модернізованої паливної системи лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1. Розроблене устаткування вбудоване в паливну систему та готує ВПЕ для лабораторного дизель-генератору. Для запобігання потрапляння ВПЕ в чисте паливо при різних аваріях та нештатних ситуаціях в схемі передбачено наявність запобіжної цистерни в яку перекачується ВПЕ. Процентний склад води в приготуваній суміші контролюється вимірювачем кількості води в паливі перед входом в двигун.

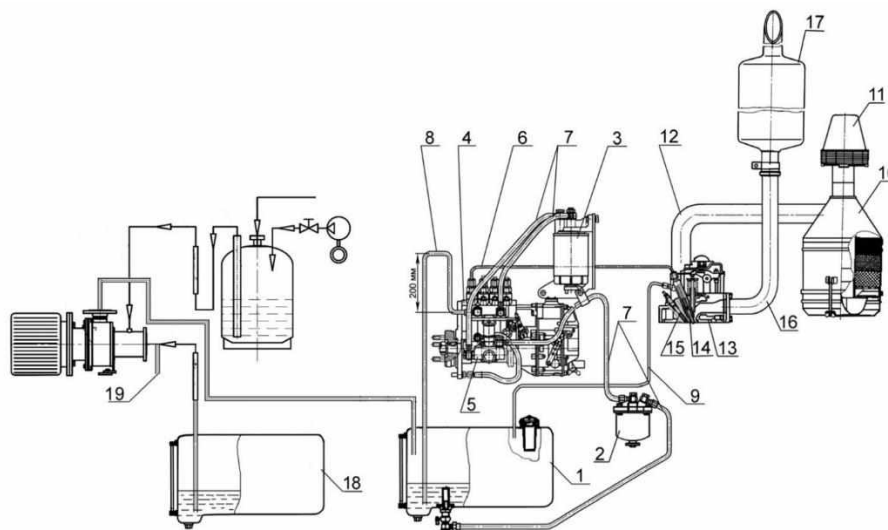


Рисунок 9 – Паливна система лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1 після модернізації [16]: 1 – паливний бак з ВПЕ; 2 – фільтр грубої очистки палива; 3- фільтр тонкого очищення палива; 4 – паливний насос високого тиску; 5 – паливопідкачуючий насос; 6 – трубки паливні високого тиску; 7 – трубки паливні низького тиску; 8 - трубка паливна низького тиску для відведення надлишків палива; 9 - трубка відведення палива в бак; 10 - очищувач повітря; 11 – моноциклон; 12 - впускний колектор; 13 – головка циліндрів; 14 – форсунка; 15 – свічка розжарювання; 16 – випускний колектор; 17 – глушник; 18 – паливний бак; 19 – місце додавання емульгатору

У порівнянні зі звичайним важким паливом використання водно-паливної емульсії дозволяє підвищити коефіцієнт спалювання палива і зменшити шкідливі викиди в атмосферу. Механізм цього ефекту пояснюється наступним. Важке паливо, потрапляючи в камеру згорання, розпорошується форсункою. Якщо в такій краплі палива перебувають включення більше дрібних крапель води, то, потрапляючи в область високої температури в циліндрі двигуна, краплі вибухають, розриваючи частки палива на безліч більш дрібних частинок, утворюючи «вторинний розпил». Це обумовлено великою різницею температур кипіння палива (430...550 °C) і води (100 °C). Описане вище явище обумовлює високу швидкість випаровування палива в циліндрі двигуна і більш швидке і повне вигорання його легких складових на першому етапі горіння. Далі, на другому етапі горіння, при досягненні високої температури в циліндрі двигуна від горіння легких фракцій палива, пари води і палива дисоціюють на активні радикали (H , OH та ін.). Ці радикали, які є каталізаторами горіння вуглецю, значно скорочують час горіння важких складових палива, у першу чергу залишків сажі. У результаті, на заключній стадії горіння палива в циліндрі двигуна, час вигорання залишків сажі, що становить до 40 % загального часу горіння краплі звичайного палива, у емульгованому паливі істотно скорочується. При цьому сумарна швидкість і повнота згорання в циліндрі двигуна палив у вигляді ВПЕ стає приблизно однаковою швидкості згорання легких дизельних палив. І, як результат, в'язке паливо повністю встигає згорати в циліндрах дизелів, різко знижуються відкладення нагару на деталях ЦПГ. Шкідливого впливу на деталі паливної апаратури частинки води водо-паливної емульсії не роблять, так як їх розміри менше зазорів у плунжерних парах і форсунках, а частинки води оточені зовні щільною плівкою палива, що оберігає від безпосереднього контакту металу з водою.

Нижче наводяться результати першого дослідження лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1 при роботі його на ВПЕ приготуваної за допомогою розробленого РПА та на паливі без додавання води (рис. 10 та рис. 11).

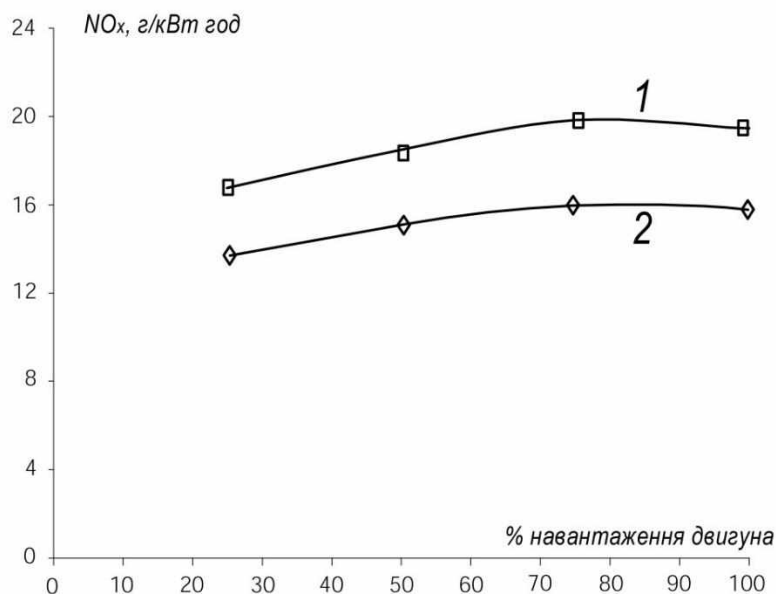


Рисунок 10 – Зміна концентрації оксидів азоту NO_x у залежності від навантаження двигуна:
1) графік NO_x палива без води; 2) графік NO_x ВПЕ з застосуванням розробленого РПА.

Висновки. Проаналізувавши різноманітність апаратів для приготування ВПЕ, було вибрано для розробки роторно-пульсаційний апарат, який дозволив приготувати більш якісну та стійку ВПЕ. Для підвищення якості та стійкості приготування ВПЕ, в апарат було додано пристрій дозування води, який подає воду до апарату певного діаметра крапель та її необхідну кількість.

Також розроблено схему установки розробленого РПА та схему паливної системи після модернізації. У ході випробувань розробленого РПА на лабораторному дизель-генераторі з двигуном Д-246.1, при роботі його на ВПЕ приготовленої за допомогою розробленого РПА та на паливі без додавання води, було виявлено зниження вмісту NO_x у порівнянні з паливом без вмісту води, що й свідчить про працездатність розробленого РПА.

У висновку всіх виконаних досліджень можна стверджувати, що розроблений РПА, виконує покладені на нього функції, та може використовуватися для зниження викидів NO_x на суднах.

Перспективи подальших досліджень:

- продовжити випробування апарату на різних сортах палива та різних дизельних двигунах;
- випробувати апарат у хімічній, нафтопереробній, паливо-енергетичній промисловості, зокрема для приготування до спалювання в котлоагрегатах або зберігання різних паливних сумішей (отримання емульсій паливних сумішей, у тому числі мазуту, що містить воду);
- більш докладніше проаналізувати під час досліджень відсоток зменшення викидів шкідливих речовин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Prado J. M., Dalmolin I., Carareto N. D. D., Basso R. C. et al 2012 Show more Supercritical fluid extraction of grape seed: Process scale-up, extract chemical composition and economic evaluation J. of Food Engineer. 109 (2) 249–57.
2. Kaluza P., Kölzch A., Gastner M., & Blasius B. The complex network of global cargo ship movements. J. R. Soc. Interface, 7. 1093–1103.

3. Kegl P., & Pehan S. Reduction of diesel engine emissions by water injection. SAE Technical Paper Series, 2001-01-3259.
4. MAN Diesel & Turbo. How to influence CO₂ emissions. Retrieved December 3, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-00_83-00ppr_low.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-00_83-00ppr_low.pdf).
5. MAN Diesel & Turbo. Project guides. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html](http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html).
6. MAN Diesel & Turbo. Tier III compliance low speed engines. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html](http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html).
7. Fiori L. Supercritical extraction of grape seed oil at industrial-scale: Plant and process design, modeling, economic feasibility Chem. Engineer. and Proc.: Process Intensificat. 49 (8) 866–72.
8. Khanal Ramesh C. Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins Food Res. Int. 43 (5) 1464–9.
9. Teleshev A. T., Marynkin I. A., Titov I. N et al 2016 Obtaining liquid humic biological product based on vermicompost and grape squeeze Bull. of biotechnol. and physico-chemi. Biol. 12(4) 52–5.
10. Konovalov A. I. Formation of nanoscale molecular ensembles in highly diluted aqueous solutions J. of RAS 83(12) 1076–82.
11. Rogovsky V. S., Matyushin A. L., Shimanovsky N. L. et al 2010 Antiproliferative and antioxidant activity of new derivatives of dihydroquercetin Experimental and Clin. Pharmacol. 9 39–42.
12. Novikov V. S. “Homogenization and dispersion in modern technology: a review,” Pom. Teplotekh., 12, No. 5, 40–59 (1990).
13. Augustina O. Emulsion Treatment in the Oil Industry: A Case Study of Oredo Field Crude Oil Emulsion [Text] / O. Augustina, S. Okotie // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2015. doi: 10.2118/178381-ms.
14. Malahov A. V. Jet forces analysis for cones [Text] / A. V. Malahov, O. V. Streltsov, I. Z. Maslov, R. G. Gudilko // Proceedings of the 1st International Academic Conference “Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science”, 2014.
15. Yuan Z. Risk analysis on ship to ship crude oil transfer at sea [Text] / Z. Yuan, W. Su // 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2015. doi: 10.1109/ictis.2015.7232202.
16. Врублевський Р. Є. Використання роторно-пульсаційного апарату для приготування водно-паливної емульсії // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.-практ. конф., 07-09 вер. 2022 р.: тези доп. Херсон: ХДМА. 2022. С. 79–82.
17. Врублевський Р. Є. Використання гомогенізатору для підвищення економії палива та екологічних показників головного двигуна // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.-практ. конф., 16-18 бер. 2023 р.: тези доп. Херсон: ХДМА. 2022. С. 123–125.
18. Xinyan Pei, Paolo Guida, K. M. AlAhmadi, Ibrahim A. Al Ghamdi, Saumitra Saxena, William L. Roberts. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame. Fuel Processing Technology Volume 216, 1 June 2021, Page 106800. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.
19. Olanrewaju W. Bello, Ehsan Abbasi-Atibeh, Larry Kostiuk, Jason S. Olfert. Effects of external injection of deionized water and water with impurities on Water-assisted flares. Fuel Volume 340, 15 May 2023, Page 127602. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127602>.
20. Elia Colleoni, Gianmaria Viciconte, Chiara Canciani, Saumitra Saxena, Paolo Guida, William L. Roberts. Sonoprocessing of oil: Asphaltene declustering behind fine ultrasonic emulsions. Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106476>.

REFERENCES

1. Prado, J. M., Dalmolin, I., Carareto, N. D. D. (2012). Basso R C et al 2012 Show more Supercritical fluid extraction of grape seed: Process scale-up, extract chemical composition and economic evaluation J. of Food Engineer. 109(2) 249–57.
2. Kaluza, P., Kölzch, A., Gastner, M., & Blasius, B. (2010). The complex network of global cargo ship movements. J. R. Soc. Interface, 7, 1093–1103.
3. Kegl, P., & Pehan, S. (2001). Reduction of diesel engine emissions by water injection. SAE Technical Paper Series, 2001-01-3259.
4. MAN Diesel & Turbo. (2010, August 25). How to influence CO2 emissions. Retrieved December 3, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-0083-00ppr_low.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-0083-00ppr_low.pdf).
5. MAN Diesel & Turbo. (2010). Project guides. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html](http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html).
6. MAN Diesel & Turbo. (2010, August 25). Tier III compliance low speed engines. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html](http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html).
7. Fiori, L. (2010). Supercritical extraction of grape seed oil at industrial-scale: Plant and process design, modeling, economic feasibility Chem. Engineer. and Proc.: Process Intensificat. 49(8) 866–72.
8. Khanal Ramesh, C. (2010). Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins Food Res. Int. 43(5) 1464–9.
9. Teleshev, A. T., Marynkin, I. A., Titov, I. N. et al 2016 Obtaining liquid humic biological product based on vermicompost and grape squeeze Bull. of biotechnol. and physico-chemi. Biol. 12(4) 52–5.
10. Konovalov, A. I. (2013). Formation of nanoscale molecular ensembles in highly diluted aqueous solutions J. of RAS 83(12) 1076–82.
11. Rogovsky, V. S., Matyushin, A. L., Shimanovsky, N. L. et al 2010 Antiproliferative and antioxidant activity of new derivatives of dihydroquercetin Experimental and Clin. Pharmacol. 9 39–42.
12. Novikov, V. S. (1990). “Homogenization and dispersion in modern technology: a review” Pom. Teplotekh., 12, No. 5, 40–59.
13. Augustina, O. (2015). Emulsion Treatment in the Oil Industry: A Case Study of Oredo Field Crude Oil Emulsion [Text] / O. Augustina, S. Okotie // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, doi: 10.2118/178381-ms.
14. Malahov, A. V. (2014). Jet forces analysis for cones [Text] / A. V. Malahov, O. V. Streltsov, I. Z. Maslov, R. G. Gudilko // Proceedings of the 1st International Academic Conference “Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science”.
15. Yuan, Z. (2015). Risk analysis on ship to ship crude oil transfer at sea [Text] / Z. Yuan, W. Su // 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). doi: 10.1109/ictis.2015.7232202.
16. Vrublevskiy, R. Ye. (2022). The use of a rotary-pulsation apparatus for the preparation of a water-fuel emulsion [*Vykorystannia rotorno-pulsatsiinoho aparatu dlia pryhotuvannia vodno-palyvnoi emulsii*]. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, September 7-9, 2022. Kherson: KSMA. Pp. 79–82.
17. Vrublevskiy, R. Ye. (2023). Using a homogenizer to improve fuel economy and environmental performance of the main engine [*Vykorystannia homohenizatoru dlia pidvyshchennia ekonomii palyvta ekologichnykh pokaznykiv holovnoho dvyhuna*]. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, Murch 16-18, 2023. Kherson: KSMA. Pp. 123–125.
18. Xinyan Pei, Paolo Guida, K. M. AlAhmadi, Ibrahim A. Al Ghamdi, Saumitra Saxena, William L. Roberts. (1 June 2021). Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a

swirling flame. Fuel Processing Technology Volume 216, Page 106800. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.

19. Olanrewaju, W. Bello, Ehsan Abbasi-Atibeh, Larry Kostiuk, Jason S. Olfert. (15 May 2023). Effects of external injection of deionized water and water with impurities on Water-assisted flares. Fuel Volume 340, Page 127602. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127602>.

20. Elia Colleoni, Gianmaria Viciconte, Chiara Canciani, Saumitra Saxena, Paolo Guida, William L. Roberts. (2023). Sonoprocessing of oil: Asphaltene declustering behind fine ultrasonic emulsions. Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106476>.

Roman Vrublevskiy, Anatolii Dzygar, Anatolii Satulov, Anna Volkova

REDUCTION OF NO_x EMISSIONS DUE TO THE USE OF WATER-FUEL EMULSION PREPARED BY THE DESIGNED ROTOR-PULSATION APPARATUS

Marine vessels with diesel engines must comply with Regulation 13 of Annex VI of MARPOL IMO and the Technical Code 2008 NO_x. An International Air Pollution Prevention Certificate (EIAPP certificate) is required for each engine. Regardless of which technology is used to meet the requirements, the same testing requirements and NO_x emission limits must apply. The EIAPP certificate is proof that the engine system, including the NO_x emission reduction technology, is compliant. One of the methods of primary reduction of NO_x emissions by marine diesels is the use of water-fuel emulsion (WPE), where water in the form of the smallest droplets is distributed in the fuel, and its content corresponds to no more than 20% of the fuel volume.

The article analyzes the choice of an apparatus for preparing a water-fuel emulsion.

To achieve the goals of the research, a rotary-pulsation apparatus with a device for dosing and supplying water was selected.

In the process of preparing materials for publication, the design of the developed rotary-pulsation apparatus is described, the scheme of this installation and the scheme of modernization of the fuel system with the developed installation for the preparation of water-fuel emulsion are given. Also, in the course of research, an installation with this designed rotor-pulsation apparatus and a laboratory diesel generator, which runs on the D-246.2 engine, was developed.

In the course of tests of the developed rotor-pulsation device on a laboratory diesel generator with a D-246 engine, during its operation on a water-fuel emulsion prepared with the help of the developed rotor-pulsation device and on fuel without the addition of water, a decrease in the content of nitrogen oxides NO_x in compared to the fuel without water content, which testifies to the efficiency of the developed rotor-pulsation device.

The quality and stability of the water-fuel emulsion prepared by the developed rotary-pulsation apparatus and the apparatus without a dosing device were also investigated.

In the conclusion of all the conducted studies, it can be stated that the developed rotary-pulsation device fulfills the functions assigned to it and can be used to reduce emissions of nitrogen oxides NO_x on ships.

Keywords: water-fuel emulsion; rotary-pulsating apparatus; fuel; NO_x emissions; marine diesel; dispersers; fuel system modernization.

Шевченко А.П., Штрибець В.В., Маннапова О.В., Рященко О.І.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДАВАННЯ ВОДНО-ПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

Метою статті є розробка пропозицій щодо моделювання процесів подавання водно-паливних емульсій у судових дизельних двигунах для підвищення ефективності їх функціонування. Поставлена мета досягається шляхом аналізу особливостей роботи дизеля на водно-паливних емульсіях, а також процесів сумішоутворення та паливоподачі при роботі на водно-паливних емульсіях. Встановлено, що на теперішній час впровадження водно-паливних емульсій в експлуатацію у судових дизельних двигунах майже не реалізується. Доведено, що використання водно-паливних емульсій значно покращує експлуатаційні характеристики двигунів і є альтернативним паливом, оскільки вносить позитивні зміни у фізичний характер процесів подачі палива, сумішоутворення та згоряння, а також у механізм зносу і впливу навколишнього середовища на навколишнє середовище. Звичайно, використання водно-паливних емульсій водночас потребує певної зміни паливного обладнання і впровадження модуля підготовки транзиту водно-паливних емульсій, що може суттєво ускладнити установку двигуна. Досліджуючи рух водно-паливної емульсії в нагнітальному трубопроводі як двофазної рідини, визначені такі фізико-механічні властивості, як щільність, стисливість і швидкість поширення звуку. Найбільш суттєвим результатом є отримані залежності, що були наведені в статті в рамках моделювання процесів подавання водно-паливних емульсій у судових дизельних двигунах. Під час математичного моделювання було отримано залежності, що описують зміну тиску та швидкості в процесі нагнітання палива на кількох ділянках судових дизельних двигунів. Це дозволило виявити ряд локальних та інтегральних особливостей процесу, включаючи: обсяг палива, частку циклу подавання палива при посадці голки, кутове положення валу та максимальний тиск палива у порожнині насоса, на нагнітальному клапані та на інжекторі. Використання водно-паливних емульсій дозволяє знизити мінімальні стабільні швидкості на навантаженні та холостому ході, а також відповідати вимогам ДСТУ, що значно підвищує ефективність функціонування судового дизеля.

Ключові слова: судовий дизельний двигун, паливо, водно-паливні емульсії, математичне моделювання, викиди.

Постановка проблеми. На теперішній час впровадження водно-паливних емульсій (ВПЕ) в експлуатацію у судових дизельних двигунах майже не реалізується. Головним аргументом проти застосування ВПЕ є те, що вода призводить до корозії прецизійних елементів паливної апаратури і деталей циліндро-поршневої групи. Проте використання водно-паливних емульсій може підвищити паливну економічність нових дизелів на 3-7% (для старих – до 10-12%), знизити температуру процесу горіння, клапанів і поршня на 20-30 градусів і зменшити утворення вуглецю або розпушувати наявні відкладення. Для деяких типів дизельних двигунів вже було експериментально встановлено, що використання водно-паливних емульсій знижує утворення вуглецю в 1,5-2 рази і димоутворення в 2-5 разів. Тому доцільно використовувати ВПЕ для очищення деталей циліндро-поршневої групи і особливо паливної апаратури та її обприскувачів, що знижує витрати на паливо і масло, зменшує знос і перегорання випускних клапанів та знижує витрати на обслуговування.

При цьому, зазвичай сажа утворюється на стінках холодного циліндра та при використанні ВПЕ концентрація сажі зменшується в 1,5-2 рази [1]. Подібний ефект

спостерігається на швидкісних дизелях у більшому масштабі. Аморфна сажа адсорбує бензапірен на поверхні та стає капурогенною. Використання емульсії зменшує утворення аморфної сажі, тим самим знижуючи токсичність вихлопних газів. Використання ВПЕ знижує температуру вихлопних газів та самого дизеля, що дозволяє перевантажувати двигун більше часу, ніж за технічними умовами. Це особливо важливо для риболовецьких суден, які часто працюють в режимах перевантаження. Оксиди азоту утворюються в зоні високих температур при надлишку кисню, а ВПЕ знижує концентрацію кисню та температуру в камері згоряння. Використання емульсії допомагає зменшити утворення вуглецю та виділення оксидів азоту в атмосферу.

Вимоги до змісту оксидів азоту у вихлопах суднових дизельних двигунів були різко підвищені Міжнародною конвенцією щодо запобігання забрудненню з суден [2].

Наприклад, на рис. 1 наведено розрахунок викидів (приблизно), який проведений з точки зору Південної Америки для перевезення 1 000 тон вантажу між Манаусом, Бразилія та Буенос-Айресом (Аргентина) або Сантосом (Бразилія). Для морських перевезень це означає, що застосовуються міжнародні правила, тобто максимальний вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 3,5%, а для суден, побудованих після 2000 року, рівень викидів оксидів азоту 1-го рівня [5].

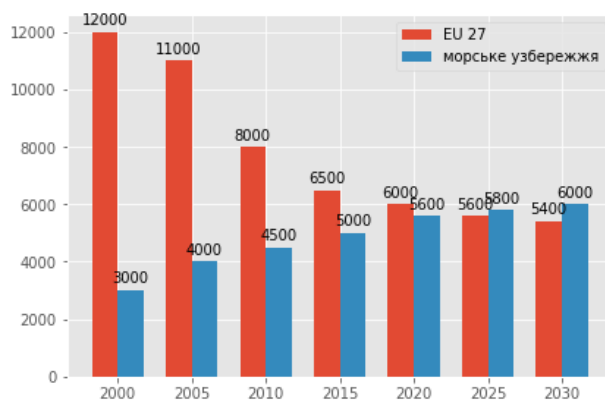


Рисунок 1 – Приклад розрахунку викидів оксидів азоту

У цьому контексті, застосування ВПЕ виявляється більш переважним, порівняно з використанням дорогих нейтралізаторів або заходів щодо дефорсування робочого процесу, які можуть призвести до втрати позитивних якостей високого газотурбінного наддуву у сучасних дизельних двигунах.

Увага повинна бути приділена впливу води на процеси горіння і механізм зносу. Каталітичний вплив води на ланцюгові реакції горіння покращує індикаторний процес ув циліндрі. Це відбувається за рахунок збільшення кількості активних центрів, а також дисоціації молекул води на атомарний водень і кисень при високих температурах, що сприяє реакціям окислення і горіння.

Підтверджується, що краплі води, які покриті оболонкою мікрокрапель палива, можуть вибухати, що поліпшує формування паливної суміші та процес перетворення паливної енергії. Також було досліджено додавання водорозчинних і нетоксичних присадок до палива, що допомагає поліпшити робочий процес. Наприклад, деякі присадки, які погано розчиняються в паливі, можуть бути розчинені у воді, такі як аміачна селітра або полівініловий спирт, що може збільшити цетанове число палива на 5%.

Існують суперечливі дані про знос двигуна, однак загальна тенденція полягає в тому, що знос зменшується на 23%. Це пояснюється тим, що в якісно приготівленій емульсії з високою дисперсією вода знаходиться в зв'язаному стані, що зменшує вуглеутворення та нейтралізує кислоти. Діаметри крапель води в емульсії порівнюються з зазорами в прецизійних елементах паливного обладнання, а водяна пара, що виходить з циліндра, має високу температуру. З цього

впливає, що значна кількість води не призводить до посилення корозійних процесів у двигуні. Однак, для уникнення можливості зрощення емульсії в щілинах елементів циліндро-поршневої групи та паливної апаратури, необхідно запускати, прогрівати та зупиняти двигун на чистому паливі.

Отже, всі вищезазначені факти свідчать про те, що використання ВПЕ значно покращує експлуатаційні характеристики двигунів і є альтернативним паливом, оскільки вносить позитивні зміни у фізичний характер процесів подачі палива, сумішоутворення та згоряння, а також у механізм зносу і вплив навколишнього середовища на навколишнє середовище. Звичайно, використання ВПЕ потребує певної зміни паливного обладнання і впровадження модуля підготовки транзиту ВПЕ, що може ускладнити установку двигуна.

Вода, яка вбирає в себе значну енергію для пароутворення, є важливою частиною ефективного робочого циклу випуску відпрацьованих газів. Однак, чим вищим є ступінь наддуву двигуна, тим менше енергії може бути перенесено. Практика підтверджує, що використання ВПЕ має значний позитивний вплив на роботу двигуна, що проявляється у зменшенні витрат палива та покращенні інших показників роботи. Для пояснення механізму позитивного впливу ВПЕ на роботу двигуна необхідно детальніше розглянути окремі підходи, зокрема зміну характеристик подачі палива, особливості розпилення палива, вплив приготування емульсії на мікрровибухи, накопичення додаткової енергії та удосконалення процесів горіння. При цьому робочі процеси подачі палива, розпалювання та утворення суміші при роботі на ВПЕ в першу чергу залежать від параметрів емульсії та особливостей процесу горіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання ВПЕ для дизельних двигунів є не досить дослідженою темою, яка залишається актуальною і сьогодні [1, 3 - 8]. Так, звіт за 2011 рік [3] є документацією по роботі, виконаній в рамках проекту "Розробка та випробування водно-паливних емульсій в якості палива для суднових двигунів для зниження викидів оксидів азоту та твердих частинок" (Udvikling og tests af vand/olieemulsioner som brændstof til skibsmotorer med henblik på reduktion NOx og partikler), спільний проект Danisco та MAN Diesel & Turbo, за часткового фінансування Датського агентства з охорони навколишнього середовища (Miljøsty). У роботі [4] доведено, що додавання води до дизельного палива знижує температуру згоряння і зменшує викиди оксидів азоту. Визначено, що найпоширенішими методами додавання води є пряме впорскування в циліндр, що комерціалізується в деяких суднових і стаціонарних дизельних двигунах, а також емульсії води в паливі. Емульговане паливо, завдяки підвищеному перемішуванню в дифузійному полум'ї дизеля, також може бути ефективним для одночасного зниження викидів оксидів азоту. Наприклад, у роботі [5] визначено, що зменшити викиди оксидів азоту можна багатьма методами, один з них – вода в паливній емульсії. За допомогою експерименту було проведено дослідження з підбору поверхнево-активної речовини. Результати експерименту показують, що 4 поверхнево-активні речовини, які найкраще підходять для дизельних двигунів – це tween 80 і span 80. Для цього експерименту потрібен певний вміст води варіації емульгатора з 10%, 15% і 20%. У цьому експерименті різні варіації води дуже впливають на продуктивність і викиди оксидів азоту. При використанні водної паливної емульсії 10% в SFOC було отримано збільшення на 216,2 г/кВт-год або 11,6% в порівнянні з паливом Pertamina Dex. Однак, вода, що використовується в паливних емульсіях з вмістом 15% і 20% SFOC, збільшує викиди порівняно з 10% емульсією. Вплив використання води в паливній емульсії призвів до зменшення викидів оксидів азоту. Вміст води в паливній емульсії зменшився на 50,5%. У цілому, рівень викидів дизельного двигуна, який використовує воду в паливній емульсії, було покращено до рівня Tier 3 специфікації правил ІМО.

Однак, наприклад, процес застосування ВПЕ з іншими фізико-механічними властивостями, температурними та в'язкісними характеристиками, що мають недостатньо інформації, на даний час не розглянуті в існуючих дослідженнях.

Метою статті є розробка пропозицій щодо моделювання процесів подавання ВПЕ у суднових дизельних двигунах для підвищення ефективності їх функціонування.

Основні результати дослідження. Математичне моделювання процесів подавання ВПЕ у судових дизельних двигунах може допомогти виявити особливості процесів паливозабезпечення, але для цього потрібна інформація про фізико-механічні властивості ВПЕ. При вивченні цих властивостей необхідно звернути увагу на відхилення, які можуть виникнути під час подачі палива з різним вмістом води в емульсії.

Досліджуючи рух ВПЕ в нагнітальному трубопроводі як двофазної рідини, визначено такі фізико-механічні властивості, як щільність, стисливість і швидкість поширення звуку. При цьому припускається, що фізична модель ВПЕ складається з двох обсягів: обсягу палива і обсягу води. Введені ряд припущень дозволили спростити задачу розрахунку швидкості поширення звуку в трубопроводі високого тиску в двофазному середовищі. Зокрема, припускається, що при якісному змішуванні води з паливом утворюються краплі води, які рівномірно розташовані в паливному середовищі. Тому можна припустити, що краплі розташовані на лініях елементарного струму з певним інтервалом. Крім того, передача імпульсу хвилі тиску забезпечується в межах центрального кута, що визначає частку середнього перерізу краплі, яка бере участь в передачі цього імпульсу.

Розрахунки дозволяють визначити коефіцієнт розсіювання хвилі тиску D у водній частині ВПЕ, що відповідає єдиній площі перетину трубки елементарного струму в межах 0,3-0,4. З урахуванням нерівномірності графіка швидкості хвилі тиску, значення D буде менше, і складатиме $2x_t/(x_v + x_t)$, що відповідає діапазону 0,25-0,4. Отже, можна записати

$$x = \sqrt{x_t^2}(1 - k_w) + Dx_v^2k_w, \quad (1)$$

де x – швидкість поширення звуку в емульсії,

x_v – швидкість поширення звуку в воді;

x_t – швидкість поширення звуку в паливі;

k_w – масова частка води в емульсії.

На рис. 2 показано результати порівняння експериментального дослідження з даними, отриманими шляхом застосування виразу (1).

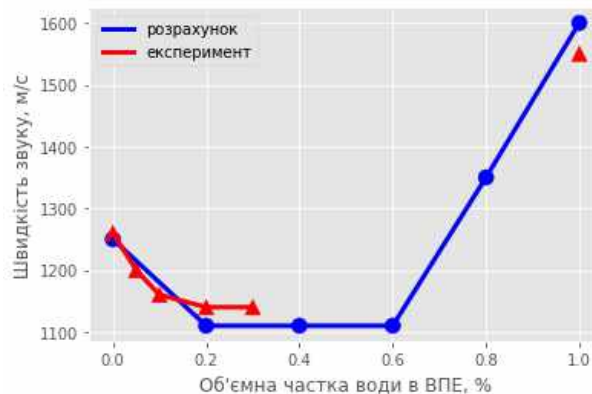


Рисунок 2 - Порівняння розрахункових і експериментальних даних

Щільність емульсії ρ можна визначити за допомогою пікнометричного методу, використовуючи закон адитивності, і це значення можна використовувати для обчислень відповідно до наступного виразу

$$\rho = \rho_t - \rho_t(1 - k_v) + \rho_vk_v, \quad (2)$$

де ρ – щільність в емульсії,

ρ_v – щільність в воді;

ρ_t – щільність в паливі;

k_v – об'ємна частка води в ВПЕ.

Об'ємний вміст води найлегше виміряти в експерименті, а зв'язок між масою та об'ємною водоносістю слід визначати з використанням виразу

$$k_w = \frac{k_v}{\rho_t(1-k_v) + \rho_v k_v}. \quad (3)$$

Якщо використовувати вираз для крапельної рідини, можна визначити стисливість ВПЕ

$$\alpha = \frac{1}{\rho a^2}. \quad (4)$$

Після цього отримаємо результати, які збігаються з результатами, отриманими експериментально для вмісту води в емульсії до 30%. При збільшенні вмісту води стисливість має знижуватися, і після досягнення значення 1 коефіцієнт стисливості емульсії наближається до стисливості води. Цей факт можна пояснити міжмолекулярними взаємодіями між компонентами емульсії. Здається, що величина стисливості ВПЕ все ще залежить від якості емульсії, а саме від розміру крапель води. Можливо, цим пояснюється різниця між експериментом та розрахунком. Щоб з'ясувати механізм взаємодії фаз в емульсії, потрібно експериментально оцінити залежність стисливості ВПЕ від вмісту води в широкому діапазоні розмірів крапель води.

Отже, отримані формули можуть бути використані для математичного моделювання процесів подачі водно-паливних емульсій. Збільшення активного удару плунжера на приблизно $0,8k_w$ призводить до збільшення максимального тиску уприскування. Це може позитивно позначитися на якості сумішоутворення та горіння для режимів, близьких до номінального. У часткових режимах підвищений активний хід плунжера ще більше посилює цей ефект та знижує міжциклову нестабільність процесів подачі палива, що також призводить до збільшення тиску уприскування.

Для вивчення особливостей подачі палива був проведений розрахунковий експеримент з використанням математичної моделі процесів подавання ВПЕ у суднових дизельних двигунах. Дослідження проводилося при номінальному режимі та при мінімально стійкій швидкості обертання колінчастого валу n_{kv} . У випадку мінімально стійкої швидкості, спостерігалися розриви безперервності палива, що чисельно описується обсягами насоса V_n та інжектора V_i (таблиці 1, 2 для дизельного палива та ВПЕ відповідно).

Таблиця 1 – Режими подачі дизельного палива

№	n_{kv} (мін ⁻¹)	h_s (см)	p_0 (МПа)	V_n (мм ³)	V_i (мм ³)
1	1000	0,54	9	-	-
2	340	-	-	21	3

Таблиця 2 – Режими подачі ВПЕ

№	n_{kv} (мін ⁻¹)	h_s (см)	p_0 (МПа)	V_n (мм ³)	V_i (мм ³)
1	1000	0,66	10,6	-	-
2	340	-	-	30	3

Під час математичного моделювання було отримано залежності, що описують зміну тиску та швидкості в процесі нагнітання палива на кількох ділянках суднових дизельних двигунів. Це дозволило виявити ряд локальних та інтегральних особливостей процесу, включаючи:

- обсяг палива, що вводиться в основній g_1 та додатковій g_2 ін'єкційній фазах;

- частку циклу подавання палива при посадці голки g_3 ;
- кутове положення вала, що відповідає початку l_1 та кінцю l_2 фази подачі палива, а також її тривалості l_3 ;
- максимальний тиск палива у порожнині насоса e_1 , на нагнітальному клапані e_2 та на інжекторі e_3 .

Наприклад, частка палива g_3 , що подається в період голкової посадки, становить приблизно 2% при швидкості посадки голки 85 см/с (замість 140 см/с для дизельного палива). При цьому має місце збільшення тривалості уприскування на 22% при затримці початкового кута подачі на 3,9 градуси кута повороту розподільного вала. Для досягнення цих результатів рекомендується введення транзитного модуля підготовки ВПЕ при режимах менше 50-60% навантаження, щоб забезпечити стабільний режим роботи навантаження. При цьому система автоматичного регулювання частоти сама вибере необхідну подачу палива. Крім того, при роботі в режимі мінімальної стабільної подачі згідно з ДСТУ 4317:2004 та ДСТУ EN ISO 8665:2018 [9, 10], подача у ВПЕ збільшується пропорційно вмісту води, а міжциклова нестабільність пропозиції зменшується, що дозволяє знизити мінімально стабільну швидкість. Крім того, максимальний тиск інжектора збільшується, а кількість палива за період посадки голки зменшується на 15-20%.

Висновки. Результати проведених експериментів показали, що використання ВПЕ має позитивний вплив на робочий процес двигуна. Однією з основних переваг ВПЕ є значне зниження вмісту оксидів азоту у вихлопних газах, а також утворення меншої кількості вуглецю в камері згоряння та вихлопному тракті. Ці чинники допомагають знизити знос циліндро-поршневої групи та забезпечити більш високі показники надійності. Головне, що робота на ВПЕ дозволяє відмовитися від складних і дорогих установок для зниження викидів оксиду азоту. Підтверджується позиція, висунута на з'їзді СІМАС [11], щодо того, що ВПЕ може бути ефективною альтернативою дизельному паливу. Також можна стверджувати, що енергія, витрачена на виробництво якісного ВПЕ, може бути повернена у баланс виконаних робіт. Для оцінки якості емульсії водного палива у транзитному модулі можна використовувати залежності, що були наведені в статті в рамках моделювання процесів подавання ВПЕ у суднових дизельних двигунах. Використання ВПЕ дозволяє знизити мінімальні стабільні швидкості на навантаженні та холостому ході, а також відповідати вимогам ДСТУ 4317:2004 та ДСТУ EN ISO 8665:2018, що значно підвищує ефективність функціонування суднового дизеля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mitsuhashi K., Takasaki K. Application of emulsified fuel to diesel engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 1978. Vol. 15, No. 2. P. 142.
2. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року : Конвенція Міжнар. мор. орг. від 02.11.1973 р. : станом на 26 верес. 1997 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_009#Text (дата звернення: 02.02.2024).
3. Andersen A., Kirsten Brauner Nyggard. Water-in-fuel emulsion as marine engine fuel for reduced NOx and particulate emissions : project / Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency. Copenhagen, 2011. 75 p. (Environmental Project No. 1380 2011). URL: <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/08/978-87-92779-30-4.pdf> (date of access: 02.02.24).
4. W. Addy Majewski. Water in Diesel Combustion. *DieselNet Technology Guide*. URL: https://dieselnet.com/tech/engine_water.php (date of access: 02.02.24).
5. Effect of Water in Fuel Emulsion on Performance and NOx of Diesel Engine / Beny Cahyono1 et al. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*. 2017. Vol. 1(4). 221–232 p. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJ7tzBqdWEAxV_IBAIHXgXCikQFnoECBAQAQ&url=http%3A%2F%2Fiptek.its.ac.id%2Findex.php%2Fijmeir%2Farticle%2Fdownload%2F2055%2F2270&usg=AOvVaw08qJhyAsc4JsTRe6NKcCMA&opi=89978449 (date of access: 02.02.23).

6. Scarpete D. Diesel-water emulsion, an alternative fuel to reduce diesel engine emission. a review. *Machines, technologies, materials*. 2013. Vol. 7. 13-16 p.
7. Yazid B. Tinjauan Penggunaan Air teremulsi dalam minyak bakar sebagai bahan bakar industri dan mesin diese : Apakah Menguntungkan atau Merugikan dan Apa Permasalahan Standarisasinya, 2015. P. 8
8. Prahara Alriga Julia. Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Emulsi dari Metanol Dengan Minyak Diesel Terhadap Performa, NOx dan Combustion Procces Pada Diesel Engine : bachelor's thesis / Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017. URL: <http://repository.its.ac.id/id/eprint/2874> (date of access: 02.02.2024).
9. ДСТУ 4317:2004. Нафтопродукти. Паливо (клас F). Класифікація. Частина 1. Категорії палива для суднових двигунів. [Чинний від 2005-10-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 8 с. (Національний стандарт України).
10. ДСТУ EN ISO 8665:2018 Судна малі. Суднові головні поршневі двигуни внутрішнього згоряння. Вимірювання та декларування потужності (EN ISO 8665:2017, IDT; ISO 8665:2006, IDT) [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. IV, 20 с. (Національний стандарт України)..
11. Vollenweider, J., Geist, M., Schaub, M. Residual fuels in emission-controlled diesel engines: Background, developments and operational results. In: Proceedings of the 1995 CIMAC Congress. Interlaken, Switzerland.

REFERENCES

1. Mitsuhashi, K., & Takasaki, K. (1978). Application of emulsified fuel to diesel engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 15(2), 142.
2. Mizhnarodna konventsia po zapobihannyyu zabrudnennyyu z suden 1973 roku [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973]. (1997, September 26). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_009#Text (in Ukrainian)
3. Andersen, A., & Nyggard, K. B. (2011). Water-in-fuel emulsion as marine engine fuel for reduced NOx and particulate emissions (Environmental Project No. 1380 2011). Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency. <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/08/978-87-92779-30-4.pdf>
4. Majewski, W. A. (n.d.). Water in Diesel Combustion. DieselNet Technology Guide. https://dieselnet.com/tech/engine_water.php
5. Cahyono, B., Gunawan, G., Mawandha, A., & Tejakusuma, I. G. (2017). Effect of water in fuel emulsion on performance and NOx of diesel engine. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 1(4), 221–232. <https://iptek.its.ac.id/index.php/ijmeir/article/download/2055/2270>
6. Scarpete, D. (2013). Diesel-water emulsion, an alternative fuel to reduce diesel engine emission. A review. *Machines, Technologies, Materials*, 7, 13–16.
7. Yazid, B. (2015). Tinjauan penggunaan air teremulsi dalam minyak bakar sebagai bahan bakar industri dan mesin diesel: Apakah menguntungkan atau merugikan dan apa permasalahan standarisasinya? [Review of the use of water emulsified in fuel oil as industrial and diesel engine fuel: Is it beneficial or detrimental and what are the standardization issues?] (p. 8). (in Indonesian)
8. Julia, P. A. (2017). Pengaruh penggunaan bahan bakar emulsi dari metanol dengan minyak diesel terhadap performa, NOx dan combustion procces pada diesel engine [The effect of using methanol-diesel fuel emulsion on performance, NOx, and combustion process in diesel engines] [Bachelor's thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/2874> (in Indonesian)
9. DSTU 4317:2004. (2004). Naftoprodukty. Palyvo (klas F). Klyasyfikatsiia. Chastyna 1. Katehorii palyva dlia sudnovykh dvyhuniv [Petroleum products. Fuel (class F). Classification. Part 1. Categories of fuels for marine engines] (National Standard of Ukraine No. 4317:2004). Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (in Ukrainian)

10. DSTU EN ISO 8665:2018. (2019). Sudna mali. Sudnovi holovni porshnevi dvyhuny vnutrishnoho zhyrannia. Vymiriuvannia ta deklaruvannia potuzhmosti [Small craft. Marine propulsion internal combustion engines. Power measurements and declarations] (National Standard of Ukraine No. EN ISO 8665:2018). DP "UkrNDNTs". (in Ukrainian)
11. Vollenweider, J., Geist, M., & Schaub, M. (1995). Residual fuels in emission-controlled diesel engines: Background, developments and operational results. *In Proceedings of the 1995 CIMAC Congress*, Interlaken, Switzerland.

Shevchenko A.P., Shtrybets V.V., Mannapova O.V., Riashchenko O.I.

MODELING THE PROCESSES OF FEEDING WATER-FUEL EMULSIONS IN MARINE DIESEL ENGINES

The aim of the article is to develop proposals for modelling the processes of feeding water-fuel emulsions in marine diesel engines to improve their efficiency. This goal is achieved by analysing the peculiarities of diesel engine operation on water-fuel emulsions, as well as the processes of mixture formation and fuel supply when operating on water-fuel emulsions. It is established that at present, the introduction of water-fuel emulsions into operation in marine diesel engines is almost not being implemented. It is proved that the use of water-fuel emulsions significantly improves the performance of engines and is an alternative fuel, since it makes positive changes in the physical nature of the processes of fuel supply, mixture formation and combustion, as well as in the mechanism of wear and environmental impact. Of course, the use of water-fuel emulsions requires a certain change in fuel equipment and the introduction of a module for preparing the transit of water-fuel emulsions, which can complicate the installation of the engine. By studying the movement of a water-fuel emulsion in a discharge pipeline as a two-phase fluid, such physical and mechanical properties as density, compressibility, and sound propagation speed were determined. The most significant result is the obtained dependencies, which were presented in the article within the framework of modelling the processes of water-fuel emulsions supply in marine diesel engines. During the mathematical modelling, the dependencies describing the change in pressure and speed during fuel injection in several areas of marine diesel engines were obtained. This made it possible to identify several local and integral features of the process, including fuel volume, the proportion of the fuel supply cycle during needle seating, the angular position of the shaft, and the maximum fuel pressure in the pump cavity, at the injection valve, and at the injector. The use of water-fuel emulsions makes it possible to reduce the minimum stable speeds at load and idle, as well as to meet the requirements of DSTU, which significantly increases the efficiency of the marine diesel engine.

Keywords: marine diesel engine, fuel, water-fuel emulsions, mathematical modelling, emissions.

Войченко Т.О., Трофименко А.О., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я.

МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ ДЛЯ МОРСЬКИХ ПОРТІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

Метою статті є розробка методу розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використання інтелектуальних агентів, який дозволяє отримати рішення, максимально близькі до оптимальних. Поставлена мета досягається шляхом постановки узагальненої модельної задачі маршрутизації, розробки процедур формування коаліцій агентів та розподілу бажаних дій агентів з можливістю зміни рейтингів успішності. Встановлено, що у сучасний час, ефективним способом є розробка інтелектуальних програмних систем на основі мультиагентних систем та правил, що використовуються в морських транспортних технологіях. Загалом, агентне моделювання широко використовується для вивчення складних динамічних систем. Інтелектуальний агент, який має властивості автономності, соціальної поведінки, реактивності та проактивності, є таким програмним об'єктом. У даній роботі термін "інтелектуальний транспортний агент" використовується для позначення агента, який розв'язує задачі маршрутизації, а також має можливість переміщення та характеристики швидкості та вантажопідйомності. Задача підвищення якості вирішення завдань маршрутизації великої розмірності на основі використання коаліцій інтелектуальних транспортних агентів, з оцінками успішності дій, що змінюються в процесі діяльності, є актуальною в рамках морських транспортних технологій. Найбільш суттєвим результатом є метод розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використання інтелектуальних агентів, що передбачає формування коаліцій агентів та розподіл бажаних дій з можливістю зміни рейтингів успішності. В рамках відповідного методу запропоновано процедури, які дозволяють забезпечити високу якість розв'язання транспортної задачі. У статті встановлено обчислювальні складності алгоритмів, що використовуються для реалізації цих процедур. Представлений підхід для створення агентів дозволяє збільшити гнучкість в їх поведінці, легко модифікувати їх і відокремити програмний код від опису дій, що визначають поведінку. Підхід, який базується на поліпшенні характеристик агентів в результаті виконання агентами дій, може бути застосований з метою наближення отриманих рішень до оптимальних результатів.

Ключові слова: морський порт, транспортна задача, маршрутизація, інтелектуальний агент, мультиагент, коаліція.

Постановка проблеми. В сучасних дослідженнях, пов'язаних з морським транспортом, значна увага приділяється проблемам транспортування та маршрутизації, які є практично важливими. Ці завдання складаються з доставки певної кількості товарів з декількох портів-джерел до різних портів – місць призначення з мінімальними витратами, якими можуть виступати як фізичні величини, так і витрати в економічному сенсі. Задачі маршрутизації сьогодні пов'язані з різними обмеженнями, такими як тип товару, властивості транспортного засобу, часові обмеження і т. д. Недоліками відомих підходів до розв'язання задач маршрутизації є неможливість практичного моделювання високовимірних систем та складність або неможливість їх використання в умовах, коли потреби портів – пунктів призначення та наявна кількість товарів у портах-джерелах можуть змінюватися з часом.

На сьогоднішній день ефективним методом є розробка інтелектуальних програмних систем на основі правил та мультиагентних систем в рамках морських транспортних

технологій. В цілому агентне моделювання широко використовується для вивчення складних динамічних систем. Інтелектуальний агент – це програмний об'єкт з автономністю, соціальною поведінкою, реактивністю та проактивністю. У цій роботі застосовується термін "інтелектуальний транспортний агент" для позначення агента, який використовується для розв'язання задач маршрутизації, а також має здатність до переміщення і характеристики швидкості та вантажопідйомності. Безпосередньо мультиагентний підхід, який характеризується децентралізацією та можливістю змінювати кількість та властивості агентів, що беруть участь у моделюванні, є основою цих систем. За допомогою цього підходу вирішуються різні завдання, такі як динамічний розподіл навантаження в системах "розумних" електричних мереж, прогнозування розвитку населених пунктів та інші. Використання систем, заснованих на правилах, для створення агентів, дозволяє підвищити гнучкість в поведінці агентів та легко модифікувати їх, а також відокремити програмний код від опису дій, що визначають поведінку. Підхід, заснований на поліпшенні характеристик агентів в результаті виконання дій, може бути застосований для того, щоб результати наближених рішень стали більш ефективними, в тому числі в рамках відповідних морських транспортних технологій.

Отже, завдання поліпшення якості розв'язання складних задач маршрутизації на основі використання коаліцій інтелектуальних транспортних агентів, які мають характеристики та оцінки успішності їх дій, що можуть змінюватись в процесі їх роботи, є актуальним у рамках морських транспортних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різні варіанти задач маршрутизації вивчаються в роботах С. Арчетті, Ж.-Ф. Кордо, Дж. Дерозьє, Г. Лапорте, А. Мінгоцці, Е.М. Бронштейн та ін. [1–8].

Наприклад, у роботі [1] визначено, що у задачі маршрутизації транспортних засобів (SDVRP) потреба клієнта може бути розподілена між кількома транспортними засобами. У статті розглядається застосування SDVRP, включаючи маршрутизацію гелікоптерів у Північному морі, а також методи розв'язання, такі як цілочисельне програмування та пошук. Розроблена нова евристика, яка поєднує змішану цілочисельну програму та алгоритм перебору записів. Евристика дає високоякісні розв'язки для шести тестових задач, які мають 50-199 клієнтів, і загалом працює набагато краще, ніж пошук за табу. Для п'яти інших задач, для яких існують нижчі межі, евристика отримує розв'язки в середньому в межах 5,85%. Нарешті, згенеровано 21 нову тестову задачу з 8-288 клієнтами. Наближений до оптимального розв'язок можна візуально оцінити для кожної задачі.

У роботі [2] представлено гібридні генетичні алгоритми для чотирьох задач маршрутизації: кольорової задачі комівояжера, задачі комівояжера з мінімаксним прибутком ($\min\max\ mTSP$), задачі комівояжера з прибутком ($TSPs\ with\ profits$) та задачі маршрутизації розділеного транспортного засобу доставки (SDVRP). Ці задачі широко застосовуються в реальному житті і є корисними для моделювання численних практичних проблем. Враховуючи, що вони є складними для обчислень, метаевристичні алгоритми, природно, представлені для вирішення великих екземплярів. Для цих задач запропоновано чотири гібридні генетичні алгоритми, пов'язані зі спеціальними операторами кросинговеру та процедурами локального пошуку. Зокрема, потужний кросовер зі збіркою ребер розширено та узагальнено для розв'язування складних задач маршрутизації. Обчислювальні дослідження, проведені на широкому спектрі тестових прикладів, показують, що запропоновані підходи вигідно конкурують з найсучаснішими алгоритмами. Додаткові експерименти показують роль ключових складових наших алгоритмів, включаючи кросовер загальної збірки ребер, локальний пошук для SDVRP та збереження різноманітності для TSP з прибутком.

У роботі [3] визначено, що задачі маршрутизації розщепленої доставки пов'язані з обслуговуванням попиту множини клієнтів за допомогою парку транспортних засобів з мінімальними витратами, коли клієнт може обслуговуватися більш ніж одним транспортним засобом, якщо це вигідно. Вони узагальнюють традиційні варіанти задач маршрутизації і мають застосування як у комерційній, так і в гуманітарній логістиці. Раніше чисті формули на основі дуг надавали полегшення лише для задач маршрутизації розбитих поставок, оскільки

можливість відвідування клієнтів більше одного разу створює проблеми з моделюванням. Єдині відомі компактні формулювання базуються на змінних, індексованих за транспортним засобом або за номером візиту, і погано працюють, коли для їх розв'язання використовується програмне забезпечення загального призначення для цілочисельного програмування. У статті представлено компактні формулювання, які уникають використання змінних, індексованих за транспортним засобом або за номером візиту, і які можуть бути використані для моделювання задач маршрутизації розщепленої доставки з часовими вікнами та без них. Обчислювальні експерименти демонструють їхню вищу продуктивність порівняно з існуючими компактними формулюваннями. Автори статті також розробили алгоритм розгалуження та відсікання, який балансує між ефективністю, отриманою від розслабленої постановки, та силою, отриманою від розширеної постановки, і продемонстрували його ефективність на великому наборі еталонних прикладів. Алгоритм вперше розв'язав 89 прикладів з доведеною оптимальністю і покращив найвідоміші нижню та/або верхню межі для багатьох інших прикладів.

Так, автори статті [3] зазначають, що переваги використання декількох агентів для вирішення складних завдань є достатньо відомими. Однак на сьогоднішній день більшість робіт в мультиагентних системах зосереджено на покращенні роботи команд агентів, припускаючи, що ці команди вже були створені вручну. Порівняно мало досліджень було проведено щодо формування коаліцій – процесу формування груп агентів з можливо конфліктуючими індивідуальними цілями, з метою покращення їх колективних можливостей. Поточні дослідження в цій галузі створили низку підходів до формування коаліцій, кожен з яких працює на основі сильних припущень про природу коаліції та сферу, в якій вона функціонує. На жаль, ці припущення, як правило, не відповідають більшості реальних умов. У цій статті описано ці припущення у світлі сучасних досліджень у сфері формування коаліцій та запропоновано новий підхід.

Але у відомій літературі відсутня інформація вирішення транспортної задачі для морських портів саме на основі використанні інтелектуальних агентів.

Метою статті є розробка методу розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використанні інтелектуальних агентів, який дозволяє отримати рішення, максимально близькі до оптимальних.

Основні результати дослідження. В якості моделі в статті в загальному сенсі розглядається задача маршрутизації. При цьому в залежності від кількості транспортних агентів – портів (пунктів відправлення) і портів (пунктів призначення) – і співвідношення потреб пунктів призначення і вантажопідйомності суден у пунктах відправлення має місце або класична транспортна задача, або мультитранспортний варіант класичної задачі маршрутизації. Загальна постановка модельної задачі має такий вигляд:

- 1) в якості вхідних даних розглядаються:
 - порти (пункти відправлення) A_i з кількістю вихідних товарів (вантажопідйомність суден у порту) a_i , де a_i – цілі числа, $i = 1, \dots, m$. Продукція однорідна;
 - порти (пункти призначення) B_j з необхідністю у товарах b_j , де b_j – цілі числа, $j = 1, \dots, n$;
 - матриця вартості $c_{ij} > 0$ транспортування з порту i до порту j . Вважаємо, що швидкості руху суден, як транспортних агентів – портів (пунктів відправлення), однакові. Таким чином, вартість перевезення пропорційна відстані між точками.

- 2) необхідно знайти кількість товарів $x_{ij} \geq 0$, що транспортується з порту i до порту j , таку, щоб $\sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ (мінімізація загальної вартості транспортування).

У даній статті пропонується метод розв'язання транспортної задачі, що має великі розміри, засновану на використанні інтелектуальних агентів, які використовують оцінки успішності. Завдання вирішується шляхом інтеграції двох таких процедур (рис. 1):

- процедура формування коаліцій з використанням характеристичної функції;
- процедура розподілу бажаних дій агентів.

Процедура формування коаліцій агентів використовує два типи агентів – порт (як пункт призначення) і порт (як джерело постачання необхідних товарів). Для кожного порту, що має потребу в доставці товару, формується коаліція портів – джерел постачання, величина загальної ваги товару якої (вантажопідйомності суден в портах – джерел постачання) дозволяє задовольнити цю потребу.

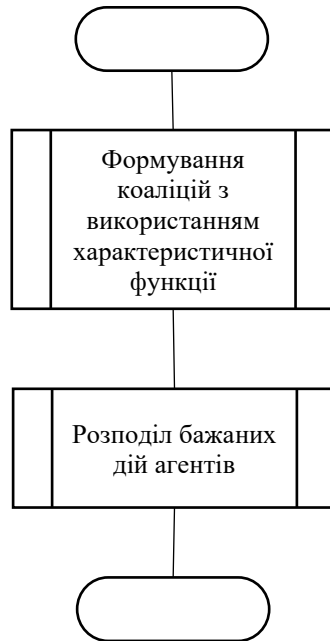


Рисунок 1 – Узагальнена структура методу розв'язання транспортної задачі для морських портів основі на використанні інтелектуальних агентів

Вихідними даними алгоритму є:

- 1) сукупність об'єктів B_j типу порт (як пункт призначення) з необхідною вагою товару ($b_j > 0$);
- 2) сукупність об'єктів A_i типу портів – джерел постачання зі значенням ваги товару, що перевозиться ($a_i \geq 0$);
- 3) матриця вартості транспортування $c_{ij} > 0$.

Отриманий результат виконання процедури має такий вигляд: для кожного об'єкта типу порт (як пункт призначення) формується коаліція об'єктів типу портів – джерел постачання або повідомлення про неможливість створення коаліції.

Процедура формування груп агентів складається з виконання таких операцій:

- 1) для обраного порту F і кожного порту T відстань обчислюється за формулою

$$L = \sqrt{(pos_x F - pos_x T)^2 + (pos_y F - pos_y T)^2} \quad (1)$$

і додається до списку разом з вагою товару, який транспортується відповідним судном з порту – джерела постачання;

2) отриманий список сортується за збільшенням відстані. Для однакових відстаней елементи сортуються відповідно до зменшення ваги товару, який транспортується відповідним судном з порту – джерела постачання;

3) перший елемент з відсортованого списку додається до списку коаліції, яка створюється. Оскільки за умови завдання необхідна вага продуктів для кожного порту (як пункту призначення) перевищує вагу продуктів, доступних у кожному порті – джерелу постачання, елементи з відсортованого списку потім додаються до списку коаліції, яка буде

створена, до тих пір, поки загальна вага портів – джерел постачання в коаліції буде дорівнювати або більше ваги поточного порту (як пункту призначення), або не залишиться елементів відсортованого списку;

4) у першому випадку повідомляється про успіх, у другому – про невдачу;

5) порти – джерела постачання, що входять в список, зменшують кількість доступних їм продуктів (насправді надлишки можуть мати тільки останні, всі попередні судна видають товар, що транспортується, повністю).

Розглянемо сутність реалізації процедури розподілу бажаних дій агентів. Коаліція агентів – це сукупність агентів, в яких:

1) дії та їх результати доступні всім агентам;

2) існують загальні цілі поведінки агентів;

3) у досягненні кожної мети бере участь більше одного агента.

На початку виконання процедури спеціальний агент-координатор або один з агентів опитує всіх агентів і отримує список дій, доступних для кожного агента. На підставі отриманої інформації впорядковуються наявні дії всіх агентів відповідно до переваги цих дій.

Потім агент-координатор будує план вирішення поставленого завдання. Якщо такий план можна побудувати, то відбувається перехід до реалізації плану. У кожного агента для кожної дії є номер, який вказує на перевагу цієї дії. Крім того, агент-координатор веде реєстр наявних агентів і зберігає числові значення, що характеризує їх надійність або успішність у виконанні завдань.

Крім описаної вище транспортної задачі, для кожного порту – джерела постачання $A_i, i = 1..m$ вказуються:

1) значення успіху агента r_i , яке визначає успішність судна A_i при виконанні поставлених завдань і може збільшуватися після участі в успішно сформованій коаліції;

2) кортеж $\langle t: p \rangle_i$ форми $\langle \text{назва завдання} \rangle: \langle \text{успішність при виконанні цього завдання} \rangle$ який вказує, які завдання може виконати порт – джерело постачання A_i і з якою ймовірністю успіху. Значення успішності дії може зрости в результаті успішного виконання завдання.

Вхідними даними, необхідними для виконання процедури є:

1) необхідні дії;

2) мінімально необхідне значення успіху;

3) множина об'єктів $A_i, i = 1..m$ типу порт – джерело постачання з даними:

– значення успіху агента порту – джерела постачання у формуванні коаліцій (дійсне $r_i > 0$);

– кортеж $\langle \text{назва завдання} \rangle: \langle \text{успіх цього завдання} \rangle$.

Результатом виконання процедури є коаліція об'єктів типу порт – джерело постачання або повідомлення про неможливість створення коаліції.

Сутність виконання процедури розподілу ролей агента полягає у такому – для обраної дії і кожного порту – джерела постачання T , здатного виконати потрібну дію, виконуються такі кроки:

1) створюється список всіх портів – джерел постачання разом зі значенням успішності обраної дії конкретним портом – джерелом постачання, яке розраховується як

$$N_{t(xi)} = r(x_i) p(x_i); \quad (2)$$

2) отриманий список сортується за спаданням;

3) з отриманого відсортованого списку його елементи вибираються послідовно, починаючи з першого, до тих пір, поки загальний успіх портів – джерел постачання в коаліції не стане дорівнювати або перевищить необхідний успіх для обраної дії, або не залишиться елементів відсортованого списку;

4) у першому випадку повідомляється про успіх, у другому – про невдачу.

Для розглянутого методу розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використання інтелектуальних агентів вірно таке:

1. складність алгоритму, що реалізує процедуру формування коаліцій агентів, дорівнює $O(n(2m + m \log m))$:

– розрахунок відстаней від кожного джерела до поточного пункту призначення, складності $O(m)$;

– сортування отриманого списку за стандартним методом. У великих списках він працює як сортування злиттям, а на менших фрагментах – як сортування вставок. Складність даного алгоритму дорівнює $O(m \log m)$;

– перегляньте отриманий список, в гіршому випадку труднощі $O(m)$.

2. складність алгоритму, що реалізує процедуру розподілу бажаних дій агентів з можливістю зміни рейтингів успішності є $O(m(2 + \log m))$:

– труднощі при складанні списку джерел з рейтингами $O(m)$;

– труднощі сортування отриманого списку – $O(m \log m)$;

– у найгіршому випадку складність формування або відмови від коаліції полягає в $O(m)$.

Висновки. У статті розглядається постановка модельної задачі маршрутизації, представлено метод розв'язання транспортної задачі для морських портів на основі використання інтелектуальних агентів. У рамках відповідного методу пропонуються процедури формування коаліцій агентів та розподілу бажаних дій агентів з можливістю зміни рейтингів успішності. Встановлено обчислювальні складності алгоритмів для реалізації запропонованих процедур. Запропоноване використання заснованих на правилах систем для реалізації агентів дозволяє підвищити гнучкість в поведінці агентів, легко модифікувати їх і дає можливість відокремити програмний код від опису дій, що визначають поведінку. Підхід, заснований на поліпшенні характеристик агентів в результаті виконання агентами дій, може бути застосований для того, щоб результати отриманих наближених рішень стали ближче до оптимальних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chen Si, Golden Bruce, Wasil Edward. The split delivery vehicle routing problem: Applications, algorithms, test problems, and computational results. *Networks*. 2007. Vol. 49. P. 318-329. DOI: 10.1002/net.20181.
2. Pengfei He. Hybrid genetic algorithm for routing problems : dissertation ... Doctor of Philosophy / Pengfei He. Angers, 2022. 158 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03967189> (date of access: 02.02.2024).
3. Munari P., Savelsbergh M. Compact Formulations for Split Delivery Routing Problems. *Transportation Science*. 2022. Vol. 56, No. 4. P. 1022–1043. DOI: 10.1287/trsc.2021.1106.
4. Michael van de Vijzel, John Anderson. Coalition Formation in Multi-Agent Systems under Real-World Conditions. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/2894034_Coalition_Formation_in_Multi-Agent_Systems_under_Real-World_Conditions (date of access: 02.02.24)
5. Archetti C., Bianchessi N., Speranza M. G. Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 238(3). P.685–698.
6. Ghadle K. P., Munot D. A. Recent advances on reliable methods for solving transportation problem and fuzzy transportation problem. *Systematic Review Article*. 2019. V. 26(2). P. 95–107.
7. Poggi A., Tomaiuolo M. Rule engines and agent-based systems. *Machine learning: Concepts, methodologies, tools and applications*. 2012. P. 211–218.
8. Doerner, K. F., Gronalt, M., Hartl, R. F., Kiechle, G., Reimann, M. Exact and heuristic algorithms for the vehicle routing problem with multiple interdependent time windows. *Computers & Operations Research*. 2008. V. 35(9). P. 3034–3048.
9. Ghadle K, Pathade P, Hamoud A. An improvement to one's BCM for balanced and unbalanced

transshipment problems by using fuzzy numbers. *Advances in Algebra and Analysis Springer*. 2019. P. 271–279.

10. Hanif M, Rafi F. A new method for the optimal solution of transportation problem in linear programming problem. *J. of Mathematical Research*. 2018 Vol. 10(5). P. 60–75.

11. Amoako S, Frimpong F, Sarpong P. Maximizing profit or minimizing cost of operation while meeting certain constraints. *Scholarly Journal of Mathematics & Science*. 2019. Vol. 1(3). P. 36–66.

REFERENCES

1. Chen, S., Golden, B., & Wasil, E. (2007). The split delivery vehicle routing problem: Applications, algorithms, test problems, and computational results. *Networks*, 49(4), 318–329. <https://doi.org/10.1002/net.20181>

2. He, P. (2022). *Hybrid genetic algorithm for routing problems* [Doctoral dissertation, Université d'Angers]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03967189>

3. Munari, P., & Savelsbergh, M. (2022). Compact Formulations for Split Delivery Routing Problems. *Transportation Science*, 56(4), 1022–1043. <https://doi.org/10.1287/trsc.2021.1106>

4. van de Vijssel, M., & Anderson, J. (2004). *Coalition Formation in Multi-Agent Systems under Real-World Conditions*.

https://www.researchgate.net/publication/2894034_Coalition_Formation_in_Multi-Agent_Systems_under_Real-World_Conditions

5. Archetti, C., Bianchessi, N., & Speranza, M. G. (2014). Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 238(3), 685–698. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.037>

6. Ghadle, K. P., & Munot, D. A. (2019). Recent advances on reliable methods for solving transportation problem and fuzzy transportation problem. *Systematic Review Article*, 26(2), 95–107.

7. Poggi, A., & Tomaiuolo, M. (2012). Rule engines and agent-based systems. In *Machine learning: Concepts, methodologies, tools and applications* (pp. 211–218). IGI Global.

8. Doerner, K. F., Gronalt, M., Hartl, R. F., Kiechle, G., & Reimann, M. (2008). Exact and heuristic algorithms for the vehicle routing problem with multiple interdependent time windows. *Computers & Operations Research*, 35(9), 3034–3048. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.001>

9. Ghadle, K., Pathade, P., & Hamoud, A. (2019). An improvement to one's BCM for balanced and unbalanced transshipment problems by using fuzzy numbers. In *Advances in Algebra and Analysis* (pp. 271–279). Springer.

10. Hanif, M., & Rafi, F. (2018). A new method for the optimal solution of transportation problem in linear programming problem. *J. of Mathematical Research*, 10(5), 60–75.

11. Amoako, S., Frimpong, F., & Sarpong, P. (2019). Maximizing profit or minimizing cost of operation while meeting certain constraints. *Scholarly Journal of Mathematics & Science*, 1(3), 36–66.

Voichenko T.O., Trofymenko A.O., Yakusevych Yu.H., Dorofieieva Z.Ia.

A METHOD FOR SOLVING THE TRANSPORTATION PROBLEM FOR SEAPORTS BASED ON THE USE OF INTELLIGENT AGENTS

The purpose of the article is to develop a method for solving a transportation problem for seaports based on the use of intelligent agents, which allows obtaining solutions that are as close to optimal as possible. This goal is achieved by formulating a generalized model routing problem, developing procedures for forming coalitions of agents and distributing the desired actions of agents with the possibility of changing success ratings. It has been established that in modern times, an effective way is to develop intelligent software systems based on multiagent systems and rules used in maritime transport technologies. In general, agent-based modelling is widely used to study complex

dynamic systems. An intelligent agent, which has the properties of autonomy, social behaviour, reactivity, and proactivity, is such a software object. In this paper, the term "intelligent transport agent" is used to refer to an agent that solves routing problems, as well as can move and characteristics of speed and carrying capacity. The task of improving the quality of solving high-dimensional routing problems based on the use of coalitions of intelligent transport agents, with assessments of the success of actions that change during activity, is relevant within the framework of maritime transport technologies. The most significant result is a method for solving the transport problem for seaports based on the use of intelligent agents, which involves the formation of coalitions of agents and the distribution of desired actions with the possibility of changing success ratings. Within the framework of the corresponding method, procedures are proposed to ensure high quality of solving the transportation problem. At the same time, the article establishes the computational complexity of the algorithms used to implement these procedures. The presented approach to creating agents allows for increased flexibility in their behaviour, easy modification, and separation of the program code from the description of actions that determine behaviour. An approach based on improving the characteristics of agents because of the actions performed by agents can be used to bring the obtained solutions closer to optimal results.

Keywords: seaport, transportation problem, routing, intelligent agent, multiagent, coalition.

УДК 629.5.03:621.31

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.15

Войченко Т.О., Шевченко А.П., Трофименко А.О., Тришин В.В.

КОНТРОЛЕР ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА МЕРЕЖУ СУДНА

Метою статті є розробка контролеру перерозподілу потужності для зменшення коливань навантаження, що генеруються споживачами в мережі морського судна. Поставлена мета досягається шляхом визначення системи рівнянь щодо перерозподілу потужності в мережі на морському судні. Встановлено, що контролер перерозподілу потужності ґрунтується на ідеї комбінування регулювання частоти відповідно до попиту та швидкого зниження навантаження у мережі. Основна ідея полягає в тому, що застосування динамічного зворотного зв'язку між енергосистемою та електричними підрулювачами може покращити регулювання частоти на судні. Завдяки відносно великій інерції судна, швидка модифікація потужності на підрулювачах, здійснена контролером перерозподілу потужності, майже не впливатиме на реакцію судна. Крім того, інші споживачі, які використовують енергію, також можуть бути задіяні для контролю перерозподілу енергії. Таким чином, розробка контролера перерозподілу потужності є важливим завданням, яке дозволяє зменшити коливання навантаження на мережу судна та підвищити ефективність його електричної системи. Найбільш суттєвим результатом є визначення нового підходу до управління перерозподілом потужності, який ґрунтується на коригуванні різниці між фактичною швидкістю обертання гребного валу та його заданою швидкістю. Цей підхід містить у собі використання двох різних стратегій управління перерозподілом потужності. Перша стратегія управління полягає у використанні зворотного зв'язку від відхилення частоти мережі для корекції відхилень швидкості гребного валу. Друга стратегія управління полягає у

використанні зворотного зв'язку від генеруючої системи для корекції відхилень крутного моменту. Встановлено, що друга стратегія має покращену робастність, але для її використання необхідний спостерігач. Для подальших досліджень можна розглянути напрямки моделювання функціонування контролеру перерозподілу потужності за другою стратегією з метою визначення надійності спостерігача до параметрів неточностей даних і можливості його використання для контролю.

Ключові слова: контролер перерозподілу потужності, судно, енергосистема, навантаження, динамічний зворотний зв'язок, електричний підрулювач, стратегія.

Постановка проблеми. Розробка системи управління електроживленням є важливим напрямком покращення управління морською електроенергетичною системою, що спрямований на підвищення стійкості системи до відключень, вирішення основних несправностей енергосистеми, зменшення експлуатаційних витрат та збереження компонентів машин енергосистеми під мінімальним навантаженням у будь-яких умовах експлуатації. Сучасні морські електроенергетичні системи мають високу функціональність, реалізовану в інтегрованих системах автоматизації, проте інструменти та методи аналізу морських енергетичних систем обмежені знаннями, доступними в рамках окремих механічних та електротехнічних дисциплін.

У зв'язку з тим, що суднова рухова установка зазвичай є найбільшим споживачем на судні, між системою управління електроживленням та руховою установкою існують важливі взаємодії. Ці взаємодії здійснюються через контролер динамічного позиціонування, алгоритм розподілу тяги, контролери локальних підрулювачів, контролери локальної частоти та напруги генераторів. Система управління електроживленням повинна забезпечувати:

- доступне управління статичним навантаженням потужності;
- контроль обмеження швидкості навантаження;
- швидке зниження навантаження.

Ці функції мають на меті уникнення відключення електропостачання та забезпечення достатньої потужності для судна у будь-який момент. Система управління електроживленням взаємодіє з іншими системами управління, щоб уникнути перерв у електропостачанні та зменшити експлуатаційні витрати. Можливості збільшення продуктивності судна, покращення його стійкості до несправностей та зменшення швидкості зносу компонентів в основному розглядаються окремо для кожної системи управління. Рішення в основному були імплікативними (наприклад, місцеве управління тягою), і мало уваги приділялося взаємодії між цими системами, електроенергетичною системою та системою управління електроживленням. Деякі питання, які можуть виникнути щодо системних взаємодій, полягають у такому:

- як впливає функціональність системи управління електроживленням на місцеве управління тягою;
- як впливає місцеве управління тягою на продуктивність енергосистеми;
- як впливають деякі споживачі на продуктивність енергосистеми та, відповідно, на інших споживачів;
- як впливає робота енергосистеми на схильність до несправностей та відключення;
- як погодні та експлуатаційні умови впливають на продуктивність енергосистеми та на загальну продуктивність судна через контроль потужності системи управління електроживленням;
- які несправності можна уникнути, якщо система управління буде переструктурована;
- як можна мінімізувати експлуатаційні витрати та впоратися з суперечливими цілями.

Отже, розробка контролера перерозподілу потужності, який зменшує коливання навантаження на мережу судна, що генерується споживачами судна, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих дослідженнях розглядаються різноманітні підходи для управління потужністю мережі на морських судах.

Наприклад, в роботах [2, 10–14] для управління тягою та гвинтами на морських суднах розглядаються різні концепції, такі як незалежна швидкість-крутний момент-потужність та комбіноване управління з антиспіновим контролем. Ці методи можуть забезпечити стабільну вихідну потужність при великих втратах крутного моменту, що спричинюється обертанням гвинта. Однак, ефекти декількох підрулювальних пристроїв та інших споживачів потужності в системі не враховуються при розробці алгоритмів управління низького рівня. Контролер локальної тяги враховує тільки локальні коливання потужності кожного окремого підрулювача, не звертаючи уваги на навантаження на систему в цілому.

Наприклад, алгоритми оптимізації розподілу тяги мають на меті знизити енергоспоживання підрулювальних пристроїв і скоротити витрати палива, забезпечуючи оптимальний розподіл потужності між судовими підрулювачами. Ці алгоритми часто використовуються в морських системах, і розглядаються у джерелах, таких як [4, 6–8]. Однак, алгоритм розподілу тяги припускає, що плавні зміни у потужності забезпечать плавні перехідні процеси в енергетичній системі. Це не завжди можливо, коли гвинти зазнають значних втрат тяги і крутного моменту. Крім того, алгоритм обмежений лише руховими навантаженнями, а інші навантаження, які можуть призвести до значних коливань навантаження в мережі, не враховуються. Нарешті, алгоритм розподілу тяги не вирішує проблеми несправностей або поломок, які можуть вплинути на загальну реакцію судна.

Деякі пристрої для зберігання енергії, такі як акумулятори, конденсатори та маховики, можуть використовуватись для компенсації коливальної потреби в енергії в електричній мережі. Часто пропонується управління гібридними електричними транспортними засобами на основі оптимізації систем управління електроживленням статтях [1, 5, 9]. Незважаючи на те, що ця технологія може забезпечити економію енергії та покращення регулювання частоти та напруги, вона не широко використовується на морських суднах через її великі розміри та вагу.

Регулювання комутації частотного попиту полягає у застосуванні пристроїв управління, які автоматично вмикають та вимикають машини та пристрої відповідно до відхилень частоти з метою забезпечення балансу між попитом та пропозицією електроенергії [3].

Метою статті є розробка контролеру перерозподілу потужності для зменшення коливань навантаження, що генеруються споживачами в мережі морського судна.

Основні результати дослідження. Контролер перерозподілу потужності (КПП) базується на поєднанні ідей щодо регулювання частоти на основі попиту та швидкого зниження навантаження. Основна ідея полягає в тому, що динамічний зворотний зв'язок від енергосистеми до електричних підрулювачів може вдосконалити регулювання частоти на морському судні. Завдяки відносно великій інерції судна, швидка модифікація потужності на підрулювачах, введена КПП, не суттєво впливатиме на реакцію судна. Крім того, інші споживачі, які покладаються на енергію, також можуть бути використані для контролю.

Запропоноване управління перерозподілом потужності є поєднанням регулювання швидкості та потужності тяги на основі мережі. Це управління може бути використане для зниження коливань навантаження на несправній підрульовій установці та перерозподілу надлишкової енергії в мережі між іншими підрулювачами та споживачами, що забезпечує значні покращення стабільності мережі та інтелектуальної обробки обладнання. КПП обмежує коливання навантаження на підрулювальну установку в умовах великих втрат тяги. Крім того, він може обмежувати тягу на тій же підрулювальній установці лише у випадку, якщо тяга викликає в мережі високий рівень коливань навантаження.

Пропонований підхід щодо управління перерозподілом потужності базується на виправленні різниці між швидкістю обертання гребного валу ω_{0p} і його заданою швидкістю обертання ω_p , і використовує дві різні стратегії управління.

Перша стратегія полягає у використанні зворотного зв'язку від відхилення частоти мережі для корекції відхилень швидкості гребного валу

$$e_p = \omega_{0p} - \omega_p + k_{gp} (\omega_g - \omega_{0g}). \quad (1)$$

Друга стратегія управління полягає у використанні зворотного зв'язку від генеруючої системи для корекції відхилень крутного моменту

$$e_p = \omega_{0p} - \omega_p + k_{gp} (\hat{Q}_{mg*} - Q_{eg}), \quad (2)$$

де k_{gr} – приріст зворотного зв'язку.

Після зменшення крутного моменту механічного двигуна забезпечується демпфування генератора. Оцінювач стану (спостерігач), використовується для шумової фільтрації вимірювань частоти та крутного моменту.

На рис. 1 показано концептуальну схему КПП для другої стратегії.

Сутність аналізу замкнутого циклу та ефекти навантаження на мережу в рамках двох різних стратегії управління полягає у такому.

За допомогою зворотного зв'язку від відхилення частоти мережі в рівнянні (1), перша стратегія призводить до зміни крутного моменту двигуна тяги

$$Q_{mp} = k_{pp}(\omega_{0p} - \omega_p) + k_{pp}k_{gp}(\omega_g - \omega_{0g}). \quad (3)$$

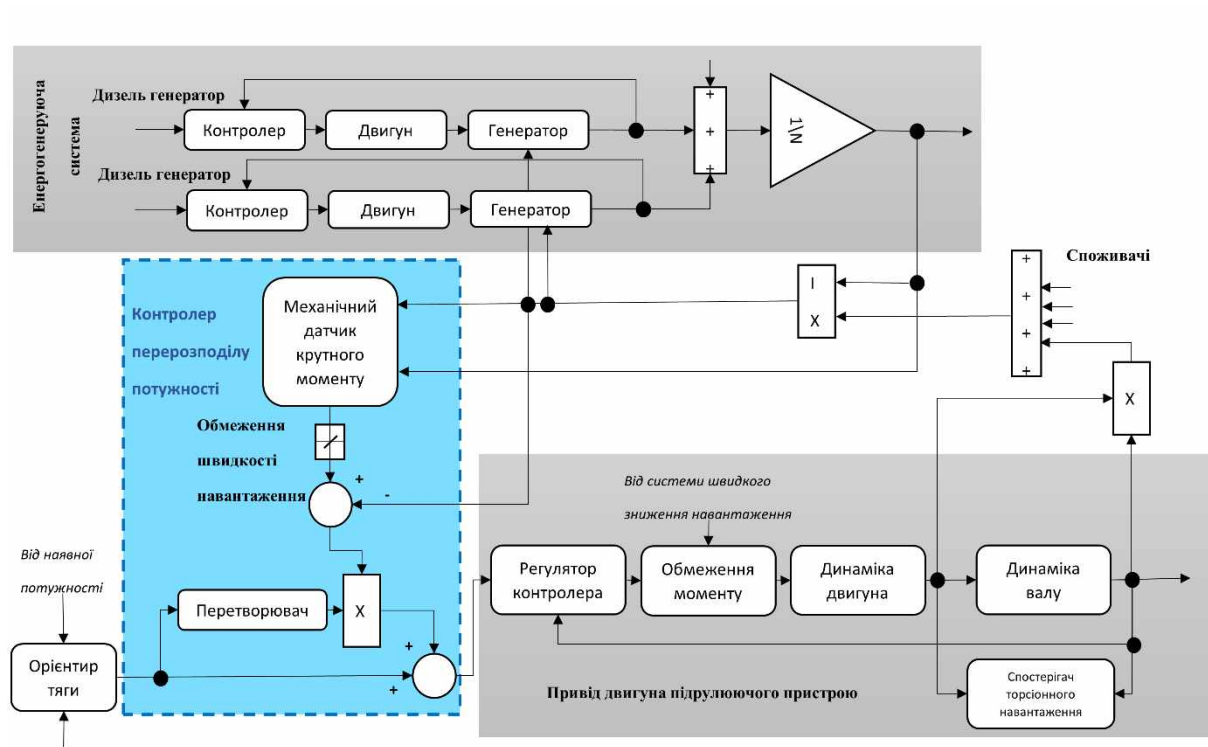


Рисунок 1 – Концептуальна схема контролера перерозподілу потужності на морському судні

При цьому рівняння замкнутого циклу формально задається як

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{\omega_{0g}}{2H_{Non}} \left[Q_{mg} - \frac{D_g}{\omega_{0g}} (\omega_g - \omega_{0g}) - \frac{\omega_p k_{pp}}{P_{rg} \omega_g} (\omega_{0p} - \omega_p) - \frac{k_{gp} \omega_p k_{pp}}{P_{rg} \omega_g} (\omega_g - \omega_{0g}) \right] \quad (4)$$

Зауважимо, що використання зворотного зв'язку тяги з частотним відхиленням генератора сприяє збільшенню демпфування у рівнянні замкнутого циклу частоти. Це призводить до зменшення коливань частоти шляхом компенсації навантаження, що, у свою чергу, підвищує стабільність системи. Якщо частота генератора зростає, опорна тяга тимчасово зростає, що допомагає збільшити енергію системи. Якщо частота зменшується, опорна тяга зменшується, тому зменшується навантаження на систему. Зміна опору навантаження є тимчасовою, поки не

буде доступний механічний крутний момент Q_{mg} від двигунів і не буде досягнуто нового балансу навантаження.

За допомогою зворотного зв'язку від відхилення крутного моменту, що генерується системою, друга стратегія призводить до зміни крутного моменту двигуна тяги

$$Q_{mp} = k_{pp}(\omega_{0p} - \omega_p) + k_{pp}k_{gp}(\hat{Q}_{mg*} - Q_{eg}). \quad (5)$$

Для демонстрації застосовності запропонованої концепції КПП було включено динаміку, яка була проігнорована раніше, до імітаційної моделі

$$Q_{mp} = k_{pp}(\omega_{0p} - \omega_p) + k_{pp}k_{gp} \frac{2H_{Non}}{\omega_{0g}} \frac{d}{dt} \omega_g. \quad (6)$$

Така залежність від прискорення генеруючої системи робить контролер тяги залежним від неї. У зв'язку з цим, рівняння замкнутого циклу набувають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{\omega_{0g}}{2H_{Non}(1+k_{pp}k_{gp}\frac{\omega_p}{P_{rg}\omega_g})} \left[Q_{mg} - \frac{D_g}{\omega_{0g}}(\omega_g - \omega_{0g}) - \frac{\omega_p k_{pp}}{P_{rg}\omega_g}(\omega_{0p} - \omega_p) \right]. \quad (7)$$

Віртуальне збільшення інерції системи здійснюється за допомогою зворотного зв'язку прискорення або контролю інерційної реакції, що призводить до зменшення частотних коливань.

Якщо в одній системі працює дві або більше керовані машини, то застосовуючи першу стратегію зворотного зв'язку від відхилення частоти мережі, можна отримати такі рівняння замкнутого циклу

$$\omega_g = \frac{\omega_{0g}}{2H_{Non}} \left[Q_{mg} - \frac{D_g}{\omega_{0g}}(\omega_g - \omega_{0g}) - \frac{1}{P_{rg}\omega_g} \sum_{p=1}^T \omega_p k_{pp}(\omega_{0p} - \omega_p) - \frac{1}{P_{rg}\omega_g}(\omega_g - \omega_{0g}) \sum_{p=1}^T k_{gp}\omega_p k_{pp} \right]. \quad (8)$$

Якщо використовувати другу стратегію зворотного зв'язку з відхиленням крутного моменту генеруючої системи, то можна отримати такі рівняння замкнутого циклу

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{\omega_{0g}}{2H_{Non} \left(1 + \frac{1}{P_{rg}\omega_g \sum_{p=1}^T \omega_p k_{pp} k_{gp}} \right)} \times \left[Q_{mg} - \frac{D_g}{\omega_{0g}}(\omega_g - \omega_{0g}) - \frac{1}{P_{rg}\omega_g} \sum_{p=1}^T \omega_p k_{pp}(\omega_{0p} - \omega_p) \right], \quad (9)$$

де $k_{pp} = k_{p1} = k_{p2}$, для $p = 1, w_p = w_1$ та для $p = 2, w_p = w_2$.

Якщо ω_1 зменшиться за рахунок збільшення навантаження на гребний вал і $\omega_{01} - \omega_1 > 0$, то контролер буде діяти, щоб врівноважити навантаження, збільшивши ω_{02} і зробивши $\omega_{02} - \omega_2 < 0$.

Висновки. У статті запропоновано КПП, який допомагає зменшити коливання навантаження на мережу судна, яке генерується споживачами судна. КПП базується на частотному регулюванні на основі попиту і швидкому зниженні навантаження. Основна ідея полягає в тому, що регулювання частоти на морському судні можна вдосконалити, використовуючи динамічний зворотний зв'язок від енергосистеми до електричних підрулювачів. Завдяки відносно великій інерції судна, швидка модифікація потужності на підрулювачах, введена КПП, не має значного впливу на реакцію судна. Інші споживачі, які покладаються на енергію, також можуть бути використані для контролю. Підхід управління КПП, запропонований в статті, ґрунтується на коригуванні різниці між швидкістю обертання гребного валу та заданою швидкістю обертання пропелера, і базується на застосуванні двох різних стратегій управління. Хоча перша стратегія є дуже простою у реалізації та може негайно

поліпшити регулювання частоти, друга стратегія забезпечує більш швидку корекцію налаштування швидкості та краще регулювання частоти з меншими зусиллями управління. Крім того, друга стратегія дозволяє встановлювати фіксовані межі швидкості навантаження безпосередньо на двигуни. В обох стратегіях запропоновано вдосконалену частотну фільтрацію з використанням спостерігача оцінювання стану. При цьому друга стратегія має вдосконалені властивості робастності. Однак, для її застосування необхідний спостерігач. Напрямами подальших досліджень є моделювання функціонування КПП за другою стратегією з метою визначення того, що спостерігач надійний до параметрів неточностей даних і придатний для контролю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Aoyagi, S., Hasegawa, Y., Yonekura, T., & Abe, H. (2001). Energy efficiency improvement of series hybrid vehicle. *JSAE Review*, 22(3), 259-264. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(01\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00100-X)
2. Bakkeheim J., Johansen T. A., Smogeli Ø., Sørensen A. J. Lyapunov-Based Integrator Resetting With Application to Marine Thruster Control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2008. Vol. 16(4). P. 908–917. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.916340>
3. Black J. W., Ilic M. Demand-based frequency control for distributed generation. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. 2002. Vol. 1. P. 427–432, doi: 10.1109/PESS.2002.1043270.
4. Fossen T. I., Johansen T. A. A Survey of Control Allocation Methods for Ships and Underwater Vehicles. *14th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06)*. Ancona, Italy, 2006. P. 1–6. DOI: 10.1109/MED.2006.328749.
5. He B., Ouyang Minggao. Optimisation-based energy management of series hybrid vehicles considering transient behavior. *International Journal of Alternative Propulsion*. 2006. Vol. 1. P. 10–22. DOI: 10.1504/IJAP.2006.010759.
6. Johansen T.A. Optimizing nonlinear control allocation. 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601). Nassau, Bahamas, 2004. P. 3435–3440 Vol. 4. DOI: 10.1109/CDC.2004.1429240.
7. Johansen T. A., Fossen T. I., Tøndel P. Efficient Optimal Constrained Control Allocation via Multi-Parametric Programming. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2004. Vol. 28(3). P. 506–515.
8. Johansen T.A., Fossen T.I., Berge S.P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2004. Vol. 12(1). P. 211–216. DOI: 10.1109/TCST.2003.821952.
9. Koot, M., J. Kessels, B. de Jager and P. van den Bosch. Fuel reduction potential of energy management for vehicular electric power systems. *International journal alternative propulsion*. 2006. Vol. 1(1). P. 112–131.
10. Pivano L., Johansen T. A., Smogeli O. N., Fossen T. I. Nonlinear Thrust Controller for Marine Propellers in Four-Quadrant Operations. *2007 American Control Conference*, New York, NY, USA, 2007, P. 900–905. DOI: 10.1109/ACC.2007.4282514.
11. Radan D., Asgeir J. Sørensen, Tor Arne Johansen. Inertial Control of Marine Engines And Propellers. *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*. 2007. Vol. 40(17). P. 323–328.
12. Smogeli Ø. N., Sørensen A. J., Fossen T. I. Design of a hybrid power/torque thruster controller with loss estimation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2004. Vol. 37(10). P. 409–414. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)31766-4](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)31766-4) (date of access: 02.02.2024).
13. Smogeli Ø. Control of Marine Propellers: from Normal to Extreme Conditions : PhD thesis. 2006. 335 p.
14. A New Method of Thruster Control in Positioning of Ships Based on Power Control / A. J. Sørensen et al. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997. Vol. 30(22). P. 199–206. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)46514-1](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)46514-1) (date of access: 02.02.2024).

REFERENCES

1. Aoyagi, S., Hasegawa, Y., Yonekura, T., & Abe, H. (2001). Energy efficiency improvement of series hybrid vehicle. *JSAE Review*, 22(3), 259–264. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(01\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00100-X)
2. Bakkeheim, J., Johansen, T. A., Smogeli, Ø., & Sørensen, A. J. (2008). Lyapunov-based integrator resetting with application to marine thruster control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(4), 908–917. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.916340>
3. Black, J. W., & Ilic, M. (2002). Demand-based frequency control for distributed generation. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, 427–432. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043270>
4. Fossen, T. I., & Johansen, T. A. (2006). A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles. In *14th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06), Italy*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2006.328749>
5. He, B., & Ouyang, M. (2006). Optimisation-based energy management of series hybrid vehicles considering transient behavior. *International Journal of Alternative Propulsion*, 1(1), 10–22. <https://doi.org/10.1504/IJAP.2006.010759>
6. Johansen, T. A. (2004). Optimizing nonlinear control allocation. In *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Vol. 4, 3435–3440. <https://doi.org/10.1109/CDC.2004.1429240>
7. Johansen, T. A., Fossen, T. I., & Tøndel, P. (2004). Efficient optimal constrained control allocation via multi-parametric programming. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 28(3), 506–515. <https://doi.org/10.2514/1.9133>
8. Johansen, T. A., Fossen, T. I., & Berge, S. P. (2004). Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(1), 211–216. <https://doi.org/10.1109/TCST.2003.821952>
9. Koot, M., Kessels, J., de Jager, B., & van den Bosch, P. (2006). Fuel reduction potential of energy management for vehicular electric power systems. *International Journal of Alternative Propulsion*, 1(1), 112–131. <https://doi.org/10.1504/IJAP.2006.010761>
10. Pivano, L., Johansen, T. A., Smogeli, O. N., & Fossen, T. I. (2007). Nonlinear thrust controller for marine propellers in four-quadrant operations. In *2007 American Control Conference*, 900–905. <https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4282514>
11. Radan, D., Sørensen, A. J., & Johansen, T. A. (2007). Inertial control of marine engines and propellers. In *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, Vol. 40, No. 17, 323–328. <https://doi.org/10.3182/20070830-3-SF-4913.00052>
12. Smogeli, Ø. N., Sørensen, A. J., & Fossen, T. I. (2004). Design of a hybrid power/torque thruster controller with loss estimation. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(10), 409–414. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)31766-4](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)31766-4)
13. Smogeli, Ø. N. (2006). *Control of marine propellers: From normal to extreme conditions* [Doctoral dissertation, Norwegian University of Science and Technology]. NTNU Open. <http://hdl.handle.net/11250/261338>
14. Sørensen, A. J., Sagli, J. R., Strand, J. P., & Mørk, T. (1997). A new method of thruster control in positioning of ships based on power control. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(22), 199–206. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)46514-1](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)46514-1)

Voichenko T.O., Shevchenko A.P., Trofymenko A.O., Tryshyn V.V.

POWER REDISTRIBUTION CONTROLLER TO REDUCE LOAD FLUCTUATIONS IN THE SHIP'S NETWORK

The aim of the article is to develop a power redistribution controller to reduce load fluctuations generated by consumers in the ship's network. This goal is achieved by determining a system of equations for redistributing power in the network on a ship. It has been established that the power

redistribution controller is based on the idea of combining frequency control according to demand and rapid load reduction. The basic idea is that the use of dynamic feedback between the power system and electric thrusters can improve frequency regulation on a ship. Due to the relatively large inertia of the ship, a rapid power modification at the thrusters by the power redistribution controller will have little effect on the response of the ship. In addition, other energy-using consumers can also be brought under control. Thus, the development of a power redistribution controller is an important task that reduces load fluctuations on the ship's network and increases the efficiency of its electrical system. The most significant result is the definition of a new approach to power redistribution control based on the correction of the difference between the actual speed of the propeller on the shaft and the set speed. This approach involves the use of two different control strategies. The first strategy is to use the feedback from the grid frequency deviation to correct the screw shaft speed deviations. The second control strategy is to use feedback from the generating system to correct torque deviations. It was found that the second strategy has improved robustness, but an observer is required to use it. For further research, it is possible to consider the directions of modelling the functioning of the power redistribution controller according to the second strategy in order to determine the reliability of the observer to the parameters of data inaccuracies and the possibility of using it for control.

Keywords: *power redistribution controller, ship, power system, load, dynamic feedback, electric thruster, strategy.*

УДК 004.032.26:629.5.017.2

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.16

Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М., Іваненко В.М.

МЕТОДИКА РОЗРОБКИ КАСКАДНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ КООРДИНАТ СУДНА НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

Метою статті є дослідження методики розробки каскадної моделі розрахунку координат судна на основі глибокого навчання, здатної прогнозувати відносну швидкість судна в нерухомій системі координат під впливом вітру і хвиль. Поставлена мета досягається шляхом побудови топології каскадної моделі розрахунку координат судна, визначення порядку формування навчального набору даних та тестування результатів навчання. Для визначення координат місця розташування судна, зокрема, з використанням автономних навігаційних систем, необхідно забезпечити стабільність судна по заданій траєкторії. Однак, супутникові навігаційні системи мають свої недоліки, такі як обмеженість використання в певних умовах, наприклад, в середовищах, де радіохвилі не проходять, а також проблеми з шумами і цілісністю системи. У випадках, коли стикаються з форс-мажорними природними явищами, які можуть пошкодити супутникові системи, стеження судна може залежати від алгоритмів обробки навігаційної інформації в автономних системах для підвищення точності і цілісності інтегрованих навігаційних систем, що використовують дані супутникової навігації. Часто визначення деяких зовнішніх факторів, таких як параметри збурення, супроводжується значними похибками, що призводить до значної невизначеності при прогнозуванні обчислюваних координат. У порівнянні з наявними алгоритмами, використання нейронних мереж може бути більш ефективним у умовах невизначеності, оскільки вони мають нелінійні властивості перетворення вхідних сигналів у вихідні. Таким чином, прогноз обчислюваних координат при впливі зовнішніх факторів повністю відповідає цим умовам. Найбільш

суттєвим результатом є каскадна модель розрахунку координат судна на основі довготривалої короточасної пам'яті (*Long short-time memory; LSTM*). В рамках подальшого напрямку роботи можна зазначити, що навіть якщо ця прогностична модель є більш точною, ніж традиційні методи, її ефективність повинна бути підвищена, щоб досягти оптимальних результатів. Також, важливо зазначити, що гіперпараметр оптимізації є ключовим елементом для моделей глибокого навчання. Гіперпараметри визначають як навчальну продуктивність моделі, так і якість її тестування.

Ключові слова: судно, координати, обчисленням шляху, модель, нейронна мережа, глибоке навчання, довготривала короточасна пам'ять.

Постановка проблеми. На підставі великої кількості експериментальних даних, які вказують на неточності в розрахунках для різних районів океану і різних типів суден, а також на основі теоретичних досліджень можна зробити висновок, що координати, які отримуються, залежать від режиму руху судна і значень деяких зовнішніх факторів. При цьому процес зміни похибок розрахунку в часі не є стабільним, а залежить від зміни зовнішніх факторів, які впливають на судно. Визначення координат місця розташування судна, особливо з використанням автономних навігаційних систем, дуже пов'язане з проблемою стабілізації судна по заданій траєкторії. Як відомо, супутникові навігаційні системи мають ряд недоліків, таких як неможливість використання в певних умовах, наприклад, в середовищах, непрозорих для радіохвиль між супутником і споживачем, а також проблеми з шумами і цілісністю системи.

У деяких умовах, наприклад, при наявності форс-мажорних природних явищ, які можуть серйозно пошкодити орбітальне угруповання супутників, системи стеження судна можуть стати єдиним засобом навігації для визначення координат. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки алгоритмів обробки навігаційної інформації в таких системах для підвищення точності автономних систем і цілісності інтегрованих навігаційних систем, що використовують дані супутникової навігації і автономних систем. Важливо відзначити, що процес зміни помилки в системах числення носить нелінійний характер.

Деякі зовнішні фактори, наприклад параметри збурення, часто визначаються з великими похибками, що призводить до значної невизначеності в прогнозуванні обчислюваних координат. На відміну від існуючих алгоритмів, нейронні мережі мають нелінійні властивості перетворення вхідних сигналів у вихідні, і можуть бути більш ефективними в умовах невизначеності. Отже, прогноз обчислюваних координат під впливом зовнішніх факторів повністю відповідає цим умовам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи машинного навчання і глибокого навчання останнім часом використовуються для вирішення практичних завдань в судноплавстві [1, 2]. Застосування полягає у підвищенні ефективності та безпеки експлуатації судна шляхом визначення траєкторії, швидкості та енергоефективності судна, а також виявлення ризиків аномалій та зіткнень. Такі нові підходи можуть підтримувати типові проблеми оптимізації доставки. Наприклад, при плануванні траєкторії судна оцінюється оцінка ризиків зіткнення або визначення корисності часу прибуття [3] можуть бути поліпшені, відповідно, за рахунок використання методів машинного навчання для виявлення перешкод [4, 5] і прогнозування швидкості. Спеціальне застосування, в якому методи машинного навчання мають важливе значення, стосується пошуково-рятувальних операцій під час морської міграції [6], які можуть бути додатково вдосконалені методами глибокого навчання для візуального виявлення та розпізнавання мови [7]. Зростаюче використання машинного навчання та методів глибокого навчання в дослідженнях морського транспорту було обумовлено різними джерелами морських даних. Однак деякі джерела, що надаються датчиками, можуть страждати від проблем з якістю і можуть бути ненадійними через збої, пов'язані з людською помилкою, апаратними несправностями, помилками програмування або неправильною установкою та налаштуванням [8]. У міру вдосконалення технологій можна розглянути деякі рішення для подолання проблем з даними [9, 10]. Тому особливу увагу слід приділити очищенню і попередній обробці даних перед проведенням будь-якого аналізу. Крім використання навігаційних даних про історичні

рейси суден і записи суднових рейсів, методи глибокого навчання на основі згорткових нейронних мереж можуть бути застосовані до супутникових і дистанційних зондувань зображень для завдань виявлення суден для поліпшення навігації і безпеки морського руху [11, 12].

Методи машинного навчання також були застосовані для вирішення проблеми прогнозування швидкості судна. Автори в роботі [13] досліджували статистичну залежність між швидкістю, обертами суднового гвинта за хвилину. Вони порівнювали лінійну регресію, аналіз авторегресії першого порядку та моделі змішаного ефекту за допомогою вимірювань контейнерних суден протягом року. Авторами роботи [14] була запропонована модель для прогнозування руху судна у вигляді часових рядів, включаючи швидкість. Вони використовували нелінійну авторегресію екзогенної мережі і модель, засновану на нейронній мережі зі зворотним зв'язком. Вони запропонували моделі, засновані на історичних вхідних змінних з даних датчиків судна для кожної змінної, для отримання багатоступеневих виходів. Автори у роботі [15] передбачили швидкість суден на внутрішніх водних шляхах за допомогою моделі на основі багатошарового перцептрона і внесли дані про розташування і швидкість суден з системи автоматичної ідентифікації (AIS). Вони порівнювали запропоновану модель з моделлю кінцевої імпульсної характеристики і авторегресійної моделлю. Автори в [16] використовували дані AIS і метеорологічний звіт з 14 танкерів і 62 вантажних суден. Вони передбачали швидкість, використовуючи набір вхідних даних, включаючи збір інформації про погоду, курс судна, осад і т. д. Вони порівнювали методи лінійної регресії, поліноміальної регресії, дерева рішень і ансамблевого дерева.

Автори в роботі [17] використовували змодельовані дані з програмного забезпечення маршрутизації для трансатлантичного маршруту конкретного контейнеровоза частотою 30 нм з байєсівськими мережами для прогнозування швидкості судна. Вони використовували в якості вхідних даних значну висоту хвиль, піковий період хвиль, вихід головного двигуна, частоту обертання вала і відносний кут зіткнення хвиль. Автори в роботі [18] запропонований MLP на основі змодельованих даних програмного забезпечення маршрутизації для прогнозування швидкості судна в різних умовах експлуатації. Входами служили вихідний крутний момент маршового двигуна, обороти вала руху, значна висота хвилі, піковий період хвиль і відносний кут зіткнення хвиль. Вони також показали, що прогнозування швидкості може бути виконано з хорошими характеристиками, використовуючи тільки фактори навколишнього середовища і не враховуючи обороти і крутний момент від двигуна. Експерименти розглядали чотири змодельовані набори даних, кожен з яких відповідав подорожі на схід або захід у Північній Атлантиці протягом чотиримісячного періоду.

Метою статті є дослідження методики розробки каскадної моделі розрахунку координат судна на основі глибокого навчання, здатної прогнозувати відносну швидкість судна в нерухомій системі координат під впливом вітру і хвиль.

Основні результати дослідження. Визначення положення судна шляхом обчислення його поточних (злічених) координат з відомого початкового курсу, швидкості з урахуванням дрейфу, дрейфу за течією і часом називається обчисленням координат судна (обчисленням шляху судна).

В якості моделі розрахунку координат судна у статті пропонується використовувати каскадну модель двох глибоких нейронних мереж, що прогнозують відносну швидкість руху судна у фіксованій системі координат.

В якості базової глибокої нейронної мережі в роботі використовується довготривала короткочасна пам'ять (Long short-time memory; LSTM) [19]. LSTM – це особливий вид архітектури рекурентних нейронних мереж, здатний вивчати довгострокові залежності. Ключовим компонентом LSTM є стан комірки, горизонтальна лінія, що проходить уздовж верхньої частини діаграми.

Графік комірок LSTM представлений на рисунку 1. У мережах LSTM використовується затвор забудки (1), вхідний затвор (2) і вихідний затвор (3). прями́й прохід комірки LSTM визначається такими рівняннями:

$$f_t = \sigma_g(W_f x_t + U_f h_t - 1 + b_f), \quad (1)$$

$$i_t = \sigma_g(W_i x_t + U_i h_t - 1 + b_i), \quad (2)$$

$$o_t = \sigma_g(W_o x_t + U_o h_t - 1 + b_o), \quad (3)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_{\tilde{c}} x_t + U_{\tilde{c}} h_t - 1 + b_{\tilde{c}}), \quad (4)$$

$$c_t = f_t c_{t-1} - 1 + i_t \tilde{c}_t, \quad (5)$$

$$h_t = o_t \tanh(c_t), \quad (6)$$

де σ_g – функція активації сигмовидної лінії;

$\tilde{c}_t$ і c_t – вектори станів комірки;

W и U – вагові матриці;

b – вектор переміщення;

h_t – вихідний вектор шару LSTM.

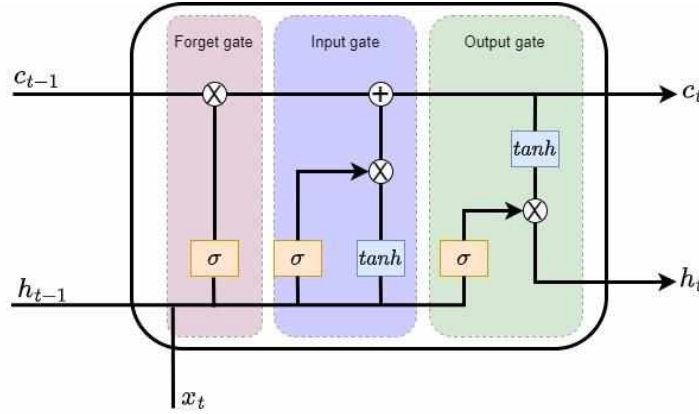


Рисунок 1 – Приклад перегляду комірки LSTM

Перша нейронна мережа LSTM 1 прогнозує швидкість дрейфу судна V_{oy1} , а навчальний набір даних формується відповідно до рівняння Ріккати

$$\frac{dV_{oy1}}{dt} = f(V_{oy1}, t) = -\frac{C_{\gamma\beta}^{\beta} \rho A_{L\sigma}}{2m(1+k_{22})} |V_{ox1}| V_{oy1} - \frac{c_2 \rho A_{L\sigma}}{2m(1+k_{22})} |V_{oy1}| V_{oy1} - \frac{C_{\gamma\beta}^{\beta} \rho A_{L\sigma}}{2m(1+k_{22})} |V_{ox1}| V_{oy1} - \frac{1.05 \rho_A A_{VL}}{2m(1+k_{22})} V_r^2 \sin \alpha_r - \frac{1+k_{11}}{1+k_{22}} V_{ox1} \frac{dK}{dt} + \frac{1}{m(1+k_{22})} \frac{F_W}{\cos \theta}, \quad (7)$$

де $C_{\gamma\beta}^{\beta}$ і c_2 – коефіцієнти, що визначають в'язкість тертя;

k_{11} і k_{22} – відповідно поздовжній і поперечний коефіцієнти з'єднаних мас;

$A_{L\sigma}$ – задана площа зануреної частини діаметральної площини;

A_{VL} – площа бічного вітрила;

ρ і ρ_A – щільність атмосферного повітря і води;

m – маса судна;

V_{ox1} – поздовжня з центром ваги, що жорстко з'єднана з судном;

V_r і α_r – швидкість і напрямок нахилу видимого вітру відповідно;

K – курс судна;

F_W – сила на стороні схвильованої поверхні моря.

Друга нейронна мережа LSTM 2 має вхідні значення, що характеризують кінематику судна, а на виході – складові вектора відносної швидкості судна в нерухомій системі координат.

У зв'язку з тим, що розмірність вектора вхідних даних в загальному випадку може змінюватися, використання повністю зв'язаних вхідних шарів каскадної моделі досить дороге у використанні, тому для вхідного аналізу будемо використовувати шари згортки (CNN) через їх особливість роботи з великими векторами і матрицями вхідних даних з поступовим зменшенням розмірності.

Загальна схема каскадної моделі розрахунку координат судна наведена на рис. 2.

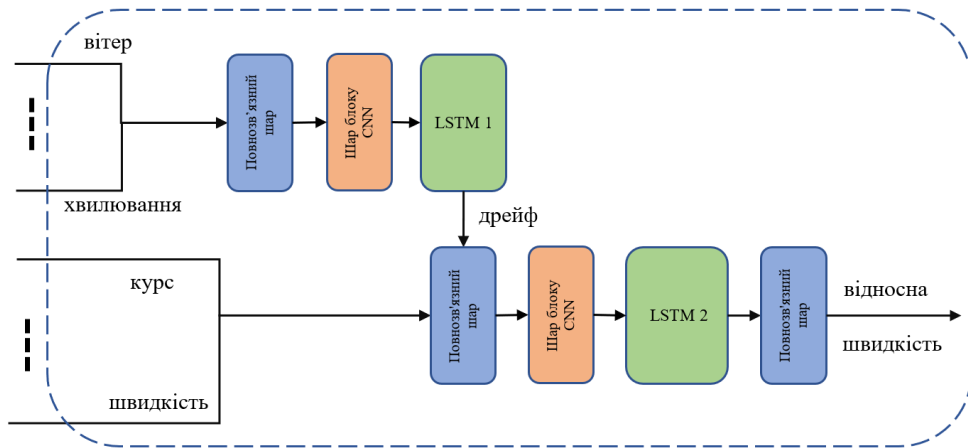


Рисунок 2 – Загальна схема каскадної моделі розрахунку координат судна

З теорії нейронних мереж відомо, що рішення диференціального рівняння (7) можна представити за допомогою динамічної нейронної мережі, що має зворотний зв'язок, а точніше нейронної мережі, що являє собою модель нелінійної авторегресії із зовнішніми входами. Таким чином, використання мережі LSTM в цьому виправдано. Давай спочатку визначимося з набором зовнішніх вхідних сигналів X , необхідних для навчання роботи мережі LSTM 1:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho |V_{ox1}| \\ \rho_A V_r^2 \sin \alpha_r \\ F_W \\ V_{ox1} \frac{dK}{dt} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

який враховує вітер, хвилі, поздовжню і кутову швидкість судна. Як вихідний сигнал, виступає швидкість дрейфу $Y = V_{oy1}$.

Оскільки мережа LSTM 1 динамічна, визначимо кількість в рядках одиничних затримок. У нашому випадку ми маємо справу з двома лініями одиничних затримок – зовнішніми вхідними значеннями і по вихідному сигналу, що подається лінією зворотного зв'язку на мережевий вхід. Дискретність моделі становить 1 с. Кількість затримок для обох ліній буде обрано рівним 15. Це означає, що мережа накопичує інформацію про динаміку роботи системи за попередні 14 с, і дає прогноз на 15 с. Тобто нейронна мережа прогнозує швидкість дрейфу корабля на крок вперед.

Мережа перетворює кінематичні характеристики в компоненти відносної швидкості. тому доцільно використовувати мережу прямого поширення як вхід до мережі LSTM 2. Вхідний вектор $\begin{pmatrix} V_{ox} \\ V_{oy} \end{pmatrix}$ має вигляд

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos K \\ \sin K \\ V_{ox1} \\ V_{oy1} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

і вихідний вектор $Y = \begin{pmatrix} V_{ox} \\ V_{oy} \end{pmatrix}$.

Тепер необхідно сформувати навчальний набір (X, Y) для подальшого навчання каскадної моделі. Визначення навчального набору зразків має на увазі якість і кількість вхідних матеріалів. Виходи визначаються однозначно за допомогою імітаційної моделі. Якість вибірок має на увазі простір можливих значень вхідного вектора, що визначається межами можливих значень його складових, а при розподілі вектору по простору, яке залежить від дискретності складових і закону розподілу, по якому відбувається вибірка складових вектору.

Спочатку визначимо межі вхідного вектора X мережі LSTM 1. Для цього необхідно вказати межі інтервалів можливих значень величин, які утворюють вхідний вектор. Крім того, виникає необхідність виділення дискретності цих можливих значень, так як занадто близькі значення, як показує практика, можуть ускладнити процес навчання нейронної мережі. Друга, третя і четверта складові вхідного сигналу є функціями декількох початкових значень, так як для їх отримання використовується стохастичний алгоритм, існує ймовірність, що після навчання в робочому режимі вхідні значення x_2, x_3, x_4 не будуть належати інтервалам, на яких навчалася мережа. А це призводить до значної втрати точності. Для того щоб уникнути такої ситуації, інтервали можливих значень деяких величин відповідають за формування сигналів x_2, x_3, x_4 потребує розширення.

У теперішній час існує чотири скінченних набори можливих значень вхідних компонентів, що зберігаються в оперативній пам'яті у вигляді векторів деякої довжини. У системі MATLAB є функція, що дозволяє генерувати псевдовипадкові натуральні числа від 1 до деякого максимуму заданого значення за законом рівномірного розподілу. Якщо вибрати в якості цієї величини кількість елементів вектора можливих значень відповідного початкового значення, кожен раз користуючись цією функцією, отримаємо псевдовипадкове значення цієї величини. Це створює псевдовипадкову часову послідовність для кожної початкової величини. Потім приступають до відповідної часової послідовності векторів вхідного сигналу $X\{X\}_{i=1-n}$. Використовуючи алгоритм вирішення рівняння Ріккаті (7), знайдемо відповідну послідовність вихідного сигналу $\{Y\}_{i=1-n}$. Таким чином, успішно формується навчальний набір даних $\{X, Y\}_{i=1-n}$.

Визначивши якість зразків для навчання, тепер необхідно вибрати їх оптимальну кількість. Незважаючи на те, що деякі дослідження нейронних мереж пропонують певні формули для оцінки необхідної кількості вибірок, на практиці ці методики не завжди працюють. Тому в цьому випадку доводиться звертатися до методу проб і помилок. Експериментально встановлено, що нейронна мережа LSTM 1 навчається на зразках, якщо їх кількість дорівнює 20 000.

Для нейронної мережі LSTM 2 аналогічним чином визначаються набори значень курсів і швидкості дрейфу. Кількість зразків для навчання було обрано методом проб і помилок і становить 10 000. Потрібну меншу кількість зразків в порівнянні з їх кількістю для мережі LSTM 1 можна пояснити тим, що друга мережа не має в своїй структурі єдиних ліній затримки і, як наслідок, вона має малу кількість вільних параметрів (ваги і пороги).

Сформувавши множину навчальних прикладів для обох мереж, проводиться їх навчання. Процедури навчання і тестування мережі складаються з трьох основних етапів: пряме поширення сигналів по мережі через кожен шар, навчання мережі за допомогою алгоритму зворотного поширення помилок, зберігання значень сигналу пам'яті в кожному прихованому шарі у вигляді ортогональної множини в багатовимірному просторі.

Після навчання каскадної моделі нейронних мереж постає завдання перевірити їх працездатність за допомогою таких послідовностей вхідних і вихідних сигналів, які не

використовувалися для навчання. Для перевірки роботи мережевої системи необхідно сформувати послідовності вхідних значень, отримати вихідні послідовності системи і порівняти їх з результатами, отриманими за допомогою імітаційної моделі.

Тестування каскадної моделі складається з двох етапів. На першому етапі не враховується часове співвідношення значень, необхідних для формування вхідного сигналу. Другий етап враховує взаємозв'язок величин як між собою, так і в часі. На кожному етапі розглядається як стаціонарний характер сигналів, так і зміни з часом. Обидва етапи доповнюють один одного. В якості критерію відповідності нейронної мережі імітаційної моделі традиційно вибирається найбільше значення обсягу в певний проміжок часу.

Таким чином, за результатами тестування каскадної моделі нейронної мережі можна зробити висновок, що побудована система з двох нейронних мереж в 2 000 модельних ситуаціях прогнозує відносну швидкість судна таким чином, щоб розбіжність між прогнозованими нею координатами і координатами, отриманими за допомогою імітаційної моделі, не перевищувала в плані те, що було визначено на практиці. Це означає, що нейронна мережа замінює алгоритм злічення, заснований на чисельному інтегруванні рівняння (2).

Таким чином, синтезована каскадна модель працює в просторі швидкостей. Перша мережа перетворює силові впливи від зовнішніх факторів у швидкість бічного дрейфу судна. Друга мережа на виході має складові вектора відносної швидкості судна у фіксованій системі координат. Абсолютна швидкість судна виходить шляхом додавання відносної і поточної швидкості. Вибір архітектури мережі багато в чому визначається роллю номера, які вони відтворюють у моделі. Для навчання мереж необхідно сформувати навчальний набір зразків за допомогою імітаційної моделі. Кількість і якість цих зразків визначається методом проб і помилок. Після закінчення навчання виникає необхідність тестування мережевої системи, яке проходить в два етапи. На першому етапі не враховується взаємозв'язок між величинами, на другому пропонується певна модель взаємозв'язку між величинами. Результати випробувань дозволяють припустити, що навчена каскадна модель практично ідентична імітаційної моделі. Тестування мережі з використанням вхідних сигналів від натурних спостережень також дозволяє зробити висновок на користь адекватності каскадної моделі нейронної мережі.

Висновки. Основним результатом є створення моделі каскадної нейронної мережі, яка здатна прогнозувати відносну швидкість судна в нерухомій системі координат під впливом вітру і хвиль. Для ефективного навчання цієї мережі необхідно мати досить великий обсяг даних, що покривають діапазон значень, які можуть зустрічатися на практиці. Це вимагає створення імітаційної моделі, здатної дати уявлення про швидкість дрейфу судна в умовах вітру і хвиль. Для цього використовуються відомі співвідношення для зовнішніх сил, що діють на судно, які дозволяють скласти диференціальне рівняння Ріккаті. Навчання нейронних мереж вимагає наборів даних. Після навчання каскадної моделі необхідно провести тестування за допомогою спеціальної методики. Результати випробувань свідчать про те, що водоспадна модель може замінити імітаційну модель з точністю, що не перевищує допустимого значення. Каскадна модель нейронної мережі, яка замінює рівняння Ріккаті, має не тільки перевагу перед диференціальною моделлю, але і здатна нелінійно перетворювати зовнішні фактори в швидкість дрейфу корабля. На відміну від відомих методів чисельного вирішення диференціальних рівнянь, які або лінеаризовані через певні проміжки часу, або обмежені сумою перших кількох доданків ряду, каскадна модель здатна обробляти складні нелінійні залежності між вхідними і вихідними даними. Хоча ця прогностична модель є більш точною, ніж традиційна практика, її ефективність повинна бути підвищена для досягнення оптимальних результатів. Також слід зазначити, що гіперпараметр оптимізації є ключовим аспектом в моделях глибокого навчання. Гіперпараметри контролюють як навчальну продуктивність моделі, так і якість її тестування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Emerging approaches applied to maritime transport research: Past and future / R. Yan et al. *Communications in Transportation Research*. 2021. Vol.1. P.100011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100011> (date of access: 02.02.2024).
2. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology / E. Tu et al. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 19, no. 5. P. 1559–1582. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2724551> (date of access: 02.02.2024).
3. Alessandrini A., Mazzarella F., Vespe M. Estimated Time of Arrival Using Historical Vessel Tracking Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20, no. 1. P. 7–15. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2789279> (date of access: 02.02.2024).
4. Öztürk Ü., Akdağ M., Ayabakan T. A review of path planning algorithms in maritime autonomous surface ships: Navigation safety perspective. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. P. 111010. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111010> (date of access: 05.03.2024).
5. Early Detection of Obstacle to Optimize the Robot Path Planning / K. Sharma et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, no. 10. P. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6100265> (date of access: 02.02.2024).
6. Hoffmann Pham, K.; Boy, J.; Luengo-Oroz, M. Data Fusion to Describe and Quantify Search and Rescue Operations in the Mediterranean Sea. In *Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, Turin, Italy, 1–3 October 2018. P. 514–523.
7. Real-Time Survivor Detection System in SaR Missions Using Robots / K. Sharma et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, no. 8. P. 219. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6080219> (date of access: 02.02.2024).
8. Automatic Identification System (AIS): Data Reliability and Human Error Implications / A. Harati-Mokhtari et al. *Journal of Navigation*. 2007. Vol. 60, no. 3. P. 373–389. URL: <https://doi.org/10.1017/s0373463307004298> (date of access: 02.02.2024).
9. Masnicki R., Mindykowski J. Case study—based zigbee network implementation for maritime on-board safety improvement. In *Proceedings of the 2019 IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea*, Genova, Italy, 3–5 October 2019. P. 3–5.
10. Zigbee-Based Low Power Consumption Wearables Device for Voice Data Transmission / A. S. AlShuhail et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 17. P. 10847. URL: <https://doi.org/10.3390/su141710847> (date of access: 02.02.2024).
11. R-CNN-Based Ship Detection from High Resolution Remote Sensing Imagery / S. Zhang et al. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, no. 6. P. 631. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11060631> (date of access: 02.02.2024).
12. Domain Adaptive Ship Detection in Optical Remote Sensing Images / L. Li et al. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 16. P. 3168. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13163168> (date of access: 02.02.2024).
13. Statistical models for the speed prediction of a container ship / W. Mao et al. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 126. P. 152–162. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.033> (date of access: 02.02.2024).
14. Neural-network-based modelling and analysis for time series prediction of ship motion / G. Li et al. *Ship Technology Research*. 2017. Vol. 64, no. 1. P. 30–39. URL: <https://doi.org/10.1080/09377255.2017.1309786> (date of access: 02.02.2024).
15. Long-Term Ship Speed Prediction for Intelligent Traffic Signaling / S. Gan et al. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, no. 1. P. 82–91. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2560131> (date of access: 02.02.2024).
16. Machine Learning Approaches for Ship Speed Prediction towards Energy Efficient Shipping / M. Abebe et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 7. P. 2325. URL: <https://doi.org/10.3390/app10072325> (date of access: 02.02.2024).
17. Krata P., Vettor R., Soares C.G. Bayesian Approach to Ship Speed Prediction based on Operational Data. In *Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures*. London: CRC Press, 2019. P. 384–390.

18. Moreira L., Vettor R., Guedes Soares C. Neural Network Approach for Predicting Ship Speed and Fuel Consumption. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 119. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9020119> (date of access: 02.02.2024).
19. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780. URL: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735> (date of access: 02.02.2024).

REFERENCES

1. Yan, R., Wang, Y., Qu, X., Nguyen, H.-D., & Prasad, N. R. (2021). Emerging approaches applied to maritime transport research: Past and future. *Communications in Transportation Research*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100011>
2. Tu, E., Jones, D., Jeffries, M., Jones, N., Li, S., Reinhardt, J., Stevens, A., van der Heide, A. J., Nguyen, V.-T., & Mellema, J. (2018). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(5), 1559–1582. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2724551>
3. Alessandrini, A., Mazzarella, F., & Vespe, M. (2019). Estimated Time of Arrival Using Historical Vessel Tracking Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 7–15. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2789279>
4. Öztürk, Ü., Akdağ, M., & Ayabakan, T. (2022). A review of path planning algorithms in maritime autonomous surface ships: Navigation safety perspective. *Ocean Engineering*, 251, 111010. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111010>
5. Sharma, K., Singh, S., Kaiwartya, O., Cengiz, K., & Vikash, C. (2022). Early Detection of Obstacle to Optimize the Robot Path Planning. *Drones*, 6(10), 265. <https://doi.org/10.3390/drones6100265>
6. Hoffmann Pham, K., Boy, J., & Luengo-Oroz, M. (2018). Data Fusion to Describe and Quantify Search and Rescue Operations in the Mediterranean Sea. In *Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*. 514–523.
7. Sharma, K., Kumar, J., Singh, S., Kaiwartya, O., Cengiz, K., & Vikash, C. (2022). Real-Time Survivor Detection System in SaR Missions Using Robots. *Drones*, 6(8), 219. <https://doi.org/10.3390/drones6080219>
8. Harati-Mokhtari, A., Wall, A., Brooks, P., & Wang, J. (2007). Automatic Identification System (AIS): Data Reliability and Human Error Implications. *Journal of Navigation*, 60(3), 373–389. <https://doi.org/10.1017/s0373463307004298>
9. Masnicki, R., & Mindykowski, J. (2019). Case study—based zigbee network implementation for maritime on-board safety improvement. In *Proceedings of the 2019 IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea*. 3–5.
10. AlShuhail, A. S., Ismail, W., & Idrus, S. M. (2022). Zigbee-Based Low Power Consumption Wearables Device for Voice Data Transmission. *Sustainability*, 14(17), 10847. <https://doi.org/10.3390/su141710847>
11. Zhang, S., Yang, X., Ma, X., Xiao, R., Cui, D., & Chen, J. (2019). R-CNN-Based Ship Detection from High Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 11(6), 631. <https://doi.org/10.3390/rs11060631>
12. Li, L., Tang, J., Wang, C., Ying, S., Luo, B., Du, X., & Wei, Y. (2021). Domain Adaptive Ship Detection in Optical Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 13(16), 3168. <https://doi.org/10.3390/rs13163168>
13. Mao, W., Eriksen, T., & Faster, M. (2016). Statistical models for the speed prediction of a container ship. *Ocean Engineering*, 126, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.033>
14. Li, G., Qian, Z., Zhu, Z., & Sheng, D. (2017). Neural-network-based modelling and analysis for time series prediction of ship motion. *Ship Technology Research*, 64(1), 30–39. <https://doi.org/10.1080/09377255.2017.1309786>

15. Gan, S., Su, Y., Meng, X., & Lam, W. H. K. (2017). Long-Term Ship Speed Prediction for Intelligent Traffic Signaling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(1), 82–91. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2560131>
16. Abebe, M., Himmetoglu, B., & Botasav, C. (2020). Machine Learning Approaches for Ship Speed Prediction towards Energy Efficient Shipping. *Applied Sciences*, 10(7), 2325. <https://doi.org/10.3390/app10072325>
17. Krata, P., Vettor, R., & Soares, C. G. (2019). Bayesian Approach to Ship Speed Prediction based on Operational Data. In *Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures* (pp. 384–390). CRC Press.
18. Moreira, L., Vettor, R., & Guedes Soares, C. (2021). Neural Network Approach for Predicting Ship Speed and Fuel Consumption. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 119. <https://doi.org/10.3390/jmse9020119>
19. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M., Ivanenko V.M.

A METHODOLOGY FOR DEVELOPING A CASCADE MODEL FOR CALCULATING SHIP COORDINATES BASED ON DEEP LEARNING

The aim of the article is to study the methodology for developing a cascade model for calculating ship coordinates based on deep learning, capable of predicting the relative speed of a ship in a fixed coordinate system under the influence of wind and waves. This goal is achieved by building the topology of the cascade model for calculating the ship's coordinates, determining the procedure for forming the training data set, and testing the training results. To determine the ship's location coordinates using autonomous navigation systems, it is necessary to ensure the stability of the ship along a given trajectory. However, satellite navigation systems have their drawbacks, such as limited use in certain environments, such as in environments where radio waves do not pass through, as well as problems with noise and system integrity. In cases where force majeure natural events are encountered that may damage satellite systems, ship tracking may depend on algorithms for processing navigation information in autonomous systems to improve the accuracy and integrity of integrated navigation systems that use satellite navigation data. Often, the determination of some external factors, such as disturbance parameters, is accompanied by significant errors, which leads to significant uncertainty in predicting the calculated coordinates. Compared to existing algorithms, the use of neural networks can be more effective under conditions of uncertainty, as they have nonlinear properties of converting input signals into output signals. Thus, the prediction of the calculated coordinates under the influence of external factors fully meets these conditions. The most significant result is a cascade model for calculating the ship's coordinates based on long short-term memory (LSTM). As a further line of work, it can be noted that even if this predictive model is more accurate than traditional methods, its efficiency should be improved to achieve optimal results. Also, it is important to note that the optimisation hyperparameter is a key element for deep learning models. Hyperparameters determine both the training performance of the model and the quality of its testing.

Keywords: ship, coordinates, path computation, model, neural network, deep learning, long-term short-term memory.

Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дорофєєва З.Я., Лісовський С.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЖИМ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ВЗАЄМОДІЇ «БЕРЕГ – СУДНО»

Метою статті є дослідження керуючих впливів електрообладнання електричної мережі на режим напруги в системі взаємодії «берег – судно» для підвищення ефективності електропостачання підприємства водного транспорту. Поставлена мета досягається шляхом дослідження схеми заміщення через ділянки передачі електроенергії в системі взаємодії «берег – судно». Встановлено, що в якості таких ділянок передачі електроенергії в означеній системі можна розглядати, по-перше, ділянку від електроживлення до трансформатора, по-друге, силовий понижуючий трансформатор, по-третє, стандартний морський електричний кабель. Доведено, що у системі взаємодії між берегом та судном конденсаторна батарея та понижуючий трансформатор мають важливу роль у керуванні реактивною потужністю. Конденсаторна батарея компенсує реактивну потужність у мережі, а понижуючий трансформатор впливає на контроль реактивної потужності. Обидва методи керування мають однаковий за модулем, але протилежний за знаком, вплив на режим напруги під час перехідних процесів, що визначає різницю в їх впливі на систему. Найбільш суттєвим результатом дослідження є розробка схем заміщення через ділянки передачі електроенергії в системі взаємодії «берег – судно» з урахуванням запропонованих рівнянь для опису керуючих впливів електрообладнання електричної мережі. При цьому визначено, що негативний вплив, який контролюється батареєю конденсаторів, може негативно вплинути на режим передачі електроенергії. Зменшення напруги призводить до зниження виробленої батареєю конденсатора потужності пропорційно до квадрату напруги, що може призвести до недостатньої реактивної потужності в системі живлення та подальшого зниження напруги. Управління понижуючим трансформатором має позитивний вплив. Це означає, що зміна напруги в мережі на 1% викликає зміну споживання реактивної потужності на 2%. Таким чином, керуючий вплив понижуючого трансформатора має подвійний вплив на режим напруги в передачі: позитивний, який сприяє стабілізації напруги, та негативний, який перешкоджає зворотному регулюванню напруги.

Ключові слова: керуючий вплив, електрообладнання, електрична мережа, режим напруги, система взаємодії «берег – судно», схема, фідер

Постановка проблеми. Поточна ситуація в системі електропостачання підприємства водного транспорту показує, що необхідно враховувати електричні навантаження суден технічного флоту і плавучих засобів, що працюють в акваторії, при розробці системи електропостачання берегових об'єктів. Середньовольтні мережі, віддалені від промислових центрів регіонів, такі як порти і причали, мають низьку інтегральну характеристику, яка є рецептором якості електроенергії. Морські електроенергетичні системи також мають аналогічні показники. Однак нелінійні і різко змінні навантаження, які спостерігаються в судових електроенергетичних системах суден технічного флоту і плавучих засобів, призводять до неконтрольованої ескалації електромагнітної обстановки.

Наведені факти свідчать про те, що забезпечення координації постачання електроенергії на наземні та плавучі об'єкти є важливим аспектом підвищення енергоефективності. Важливим фактором такої координації є врахування керуючих впливів електрообладнання електричної

мережі на режим напруги в системі взаємодії «берег-судно». Отже, тема статті актуальна і вимагає уваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи ефективності електропостачання підприємства водного транспорту [1 - 8].

Наприклад, у роботі [1] визначено, що споживання електроенергії причальними службами стрімко зростає і в даний час перевищує діапазон потужностей в 10 МВт на багатьох сучасних комерційних суднах. Можливість перекриття струму короткого замикання розподільного пристрою і кабелів, які обслуговують суднове навантаження в порту, диктує застосування середньовольтних систем розподілу електроенергії в діапазоні напруг від 5 до 21 кВ. Багато з потужних електричних навантажень середньої напруги повинні працювати під час розвантаження і завантаження суден в доці. У той самий час екологічні норми в багатьох морських портах (найбільші порти Каліфорнії є прикладом найжорсткіших вимог) не дозволяють суднам експлуатувати свої генератори всередині портів. Багато операторів суден і портів адміністрації борються з відсутністю відповідних стандартів і специфікацій для підключення судових сервісних вантажів до берегових систем розподілу електроенергії. У статті розглянуто сучасний стан та існуючі діючі стандарти підключення суден до берегових джерел живлення, перевірені способи підключення берегових джерел живлення та підходи до пом'якшення проблем, пов'язаних з джерелами живлення високої потужності та високої напруги.

У статті [2] зазначено, що розподіл постійного струму середньої напруги (MVDC) повністю електричної судової системи (АЕС) можна розглядати як функціонально складену з трьох підсистем, а саме джерел живлення, центрів навантаження та розподільних мереж. MVDC з використанням правильно розміщених вимикачів постійного струму. У цій статті наведено огляд обладнання силової електроніки, яке може бути придатним для використання в майбутніх системах живлення AES MVDC. Деякі галузеві експерименти щодо генераторних систем постійного струму, накопичувачів енергії та прототипів напівпровідникових автоматичних вимикачів постійного струму представлені в документі як приклади сучасних реалізацій. Також розглядаються різні перетворювачі постійного струму, які можуть використовуватися як твердотільні трансформатори, і пропонується структура, отримана шляхом їх об'єднання.

У роботі [3] визначено, що оскільки різні типи зберігання енергії (ES) продовжують проникати в електромережі, існує необхідність розширити традиційний аналіз, щоб охопити переглянуті показники продуктивності, пов'язані з гібридною системою зберігання енергії (HESS), яка має відповідну питому потужність, щільність енергії, час відгуку та стабільність напруги під навантаженням. У деяких критичних додатках, таких як судові енергетичні системи, рекомендується об'єднати два або більше типів систем для подолання перешкод іншого. Ця стаття математично моделює, оцінює та експериментально тестує три різних HESS з послідовною конфігурацією. Імпульсна реакція на постійне і імпульсне навантаження використовувалася для оцінки кожної моделі судової енергетичної системи. Надійність отриманої моделі і контролера була підтверджена експериментально за допомогою апаратної настройки, що імітує профіль багатоімпульсного навантаження.

Але у відомій літературі відсутня узагальнена інформація проблем дослідження керуючих впливів електрообладнання електричної мережі на режим напруги в системі взаємодії «берег – судно».

Метою статті є дослідження керуючих впливів електрообладнання електричної мережі на режим напруги в системі взаємодії «берег – судно» для підвищення ефективності електропостачання підприємства водного транспорту.

Основні результати дослідження. Система електропостачання підприємства водного транспорту має у своєму складі різні підсистеми. Наприклад, однією з таких підсистем можна вважати фідер живлення в системі взаємодії «берег – судно» (СВБС), яка містить:

- силовий трансформатор;
- силовий кабель або повітряна лінія;
- стандартний судовий електричний кабель;

- головний розподільний щит;
- суднові електроприймачі та ін.

На рис. 1 наведена схема заміщення даного фідера, де:

- $R_k, R_m, R_n; X_k, X_m, X_n$ – відповідно, кабель активного і реактивного опору, трансформатор і штатний кабель;
- $\Delta P_{st}, \Delta Q_{st}$ – втрати активної і реактивної потужності в трансформаторній сталі;
- U_n – напруга живлення;
- P_u, Q_u – активна і реактивна потужність, що подається від джерела живлення в електричну мережу судна;
- P_n, Q_n – активна і реактивна потужність судових електроприймачів;
- R_{st}, X_{st} – активні і реактивні опори, що характеризують відповідні втрати потужності в трансформаторній сталі;
- δU_o – додавання напруги на трансформатор;
- Q_n – реактивна потужність батареї конденсатора;
- БК – конденсаторна батарея, встановлена при високій напрузі в береговій електричній мережі;
- ПК – берегова живляча колонка;
- СЩЗД – силовий щит від зовнішнього джерела;
- ГРЩ – головний розподільний щит;
- СЕ – судновий електроприймач.

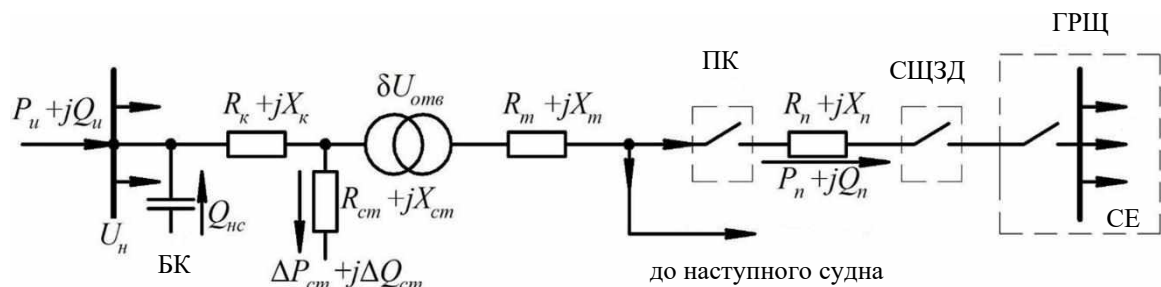


Рисунок 1 – Схема заміщення фідера електропередачі СВБС з спрямованими потоками потужності

Електричне обладнання та електричні кабелі, що використовуються для передачі електроенергії на СВБС, по-різному реагують на зміни напруги, тобто вони мають можливість контролювати та регулювати напругу. З метою виявлення керуючих впливів проводиться дослідження схеми заміщення (рис. 1), яке здійснюється через ділянки передачі електроенергії СВБС:

- перша ділянка – від електроживлення до трансформатора;
- друга ділянка – силовий понижуючий трансформатор;
- третя ділянка – стандартний морський електричний кабель.

При вивченні першої ділянки з положення керуючого впливу на напругу (рис. 2) не враховувалися такі фактори:

- реактивна потужність, вироблена потужностями фазних провідників електричного кабелю, не враховується через її значно нижчий рівень у порівнянні з реактивною потужністю, що генерується конденсаторною батареєю, що використовується для компенсації реактивної потужності;
- реактивна потужність, споживана індуктивністю кабелю, й активна потужність, споживана активним опором, істотно не впливають на режим напруги в мережі, так як втрати напруги не перевищують 2% від номінального значення;
- активна потужність, що використовується конденсаторною батареєю для виробництва реактивної потужності.

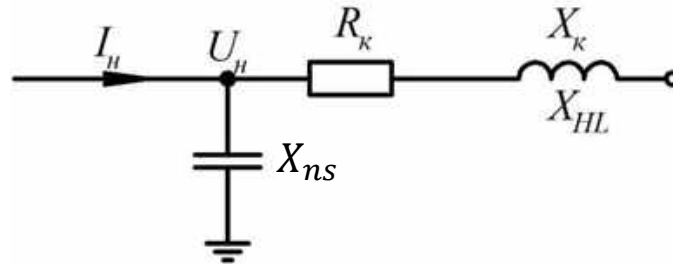


Рисунок 2 – Схема заміни перетину ділянок у вигляді постійних опорів

Реактивна потужність, використовувана батареєю конденсатора, визначається за формулою

$$Q_{ns} = -\frac{U_n^2}{X_{ns}}, \quad (1)$$

де X_{ns} – реактивний опір батареї конденсатора.

Управляючий вплив конденсаторної батареї за реактивною потужністю, що визначається як похідна від статичної характеристики в точці номінальної напруги U_n (1), складає

$$\alpha_{kb} = \frac{dQ_{ns}}{dU_n} = \frac{d(-U_n^2/X_{ns})}{dU_n} = -2 \frac{Q_{ns}}{U_n} = -2 \frac{Q_{ns*}}{U_{n*}} = -2, \quad (2)$$

де $Q_{ns*} = 1$, $U_{n*} = 1$ – реактивна потужність і напруга в мережі при номінальних значеннях у відносних одиницях. Негативний знак присвоюється тому, що реактивна потужність, що генерується батареєю конденсатора, передається в мережу (знак ємнісного опору протилежний знаку індуктивного опору, який приймається за позитивну величину).

Негативний керуючий ефект батареї конденсатора має і негативний аспект. При зниженні напруги в мережі потужність батареї конденсатора зменшується пропорційно квадрату напруги, що може привести до дефіциту реактивної потужності в центрі живлення і подальшого зниження напруги.

В рамках другої ділянки понижуючий за потужністю трансформатор у передачі СВБС є значним споживачем реактивної потужності (рис. 3).

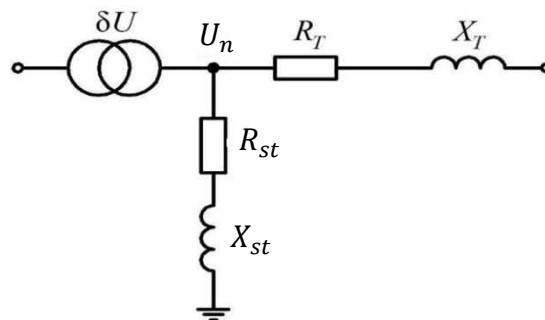


Рисунок 3 – Схема заміщення трансформатора у вигляді постійних опорів

Втрата реактивної потужності в трансформаторі становить

$$Q_t = \Delta Q_{xx} + K_z^2 \Delta Q_{kz}, \quad (3)$$

де ΔQ_{xx} – реактивні втрати холостого ходу трансформатора;

ΔQ_{kz} – реактивні втрати короткого замикання;

K_z – коефіцієнт навантаження трансформатора.

Керуючий вплив трансформатора на реактивну потужність визначається як похідне від статичної характеристики напруги в точці номінальної напруги U_n , тобто

$$\alpha_{kb} = \frac{d(Q_t)}{dU_n} = \frac{d(\Delta Q_{xx})}{dU_n} + \frac{d(K_z^2 \Delta Q_{kz})}{dU_n}. \quad (4)$$

При $U = U_n$ втрати реактивної потужності в трансформаторній сталі в режимі холостого ходу і визначаються за формулою

$$Q_{xx} = \frac{U_n^2}{X_{st}}, \quad (5)$$

де X_{st} – індуктивний опір схеми намагнічування трансформатора.

Значить, регулююча дія трансформатора в режимі холостого ходу становить

$$\alpha_{xx} = \frac{d(\Delta Q_{xx})}{dU_n} = \frac{d(U_n^2/X_{st})}{dU_n} = 2 \frac{\Delta Q_{xx}}{U_n} = 2. \quad (6)$$

де $\Delta Q_{xx*} = 1$, $U_{n*} = 1$ – відповідно реактивна потужність і напруга у відносних одиницях при номінальній напрузі.

Реактивна потужність трансформатора різко змінюється зі зміною напруги, що подається на трансформатор і може бути визначена за формулою

$$\Delta Q_{st} = \Delta Q_{xx}(1 \pm \alpha/100), \quad (7)$$

де α – напруга гілки трансформатора, %.

Втрати реактивного короткого замикання трансформатора визначаються як

$$\Delta Q_{kz} = 3I_{nom}^2 X_t = 3I_{nom} U_t, \quad (8)$$

де I_{nom} – номінальний струм трансформатора;

X_t – індуктивний поздовжній опір трансформатора;

U_t – падіння напруги на опір X_t .

Трансформатор контролює реактивну потужність, споживану в індуктивному поздовжньому опорі X_t , складає

$$\alpha_{kz} = \frac{d(K_z^2 \Delta Q_{kz})}{dU_n} = \frac{d(K_z^2 I_{nom}^2 X_t)}{dU_n} = \frac{d(K_z^2 I_{nom} U_t)}{dU_n}. \quad (9)$$

При цьому

$$U_t = U_n - U_c \ll U_n \text{ при } U_c \rightarrow U_n, \quad (10)$$

де U_c – напруга в мережі.

Отже, керуючий вплив α_{kz} не може зробити помітного впливу на режим напруги в мережі. Тому сумарний керуючий вплив трансформатора за показниками реактивної потужності становить

$$\alpha_{tr} = \alpha_{xx} + \alpha_{kz} \approx \alpha_{xx} = 2. \quad (11)$$

Керуючий вплив трансформатора на активну потужність, споживану в опорі R_t при проходженні I_n , не розглядається через мале значення цієї потужності в порівнянні з активною потужністю суднових електроприймачів.

Таким чином, регулюючий вплив силового трансформатора визначається величиною $\alpha_{tr} = \alpha_{xx} = 2$, тобто контролюючий ефект реактивної потужності. Такий керуючий ефект напруги має два аспекти, позитивний, що сприяє стабілізації напруги, і негативний, який перешкоджає зустрічному регулюванню напруги.

У межах третьої ділянки судновий електричний кабель (рис. 4) не є значним споживачем активної і реактивної потужності. Втрата активної потужності при активному опорі R_p значно менше активної потужності, споживаної судновими електроприймачами, втрата реактивної потужності на індуктивний опір кабелю X_p також незначні в порівнянні з реактивною потужністю, споживаної судновими електроприймачами.



Рисунок 4 – Схема заміщення стандартного суднового електричного кабелю

У зв'язку з вищесказаним припускаємо, що керуючий вплив на активну і реактивну потужності в цій області не може надавати помітного впливу на режим напруги в передачі СВБС.

Аналізуючи методи управління електрообладнанням на різних ділянках ланцюга заміщення (як показано на рис. 1), можна виявити важливі методи регулювання реактивної потужності, які є у конденсатора батареї і силового понижуючого трансформатора. Причому керуючі впливи даного електрообладнання на реактивну потужність мають ті ж абсолютні значення, але протилежні за знаком.: $\alpha_{kb} = 2$, $\alpha_{tr} = 2$. Це обумовлює різний характер впливу даного електрообладнання на режим напруги при перехідних режимах в електропередачі СВБС.

Висновки. Конденсаторна батарея і понижуючий трансформатор в системі взаємодії «берег – судно» мають значні методи управління реактивною потужністю. Конденсаторна батарея компенсує реактивну потужність в мережі, а понижуючий трансформатор також впливає на контроль реактивної потужності. Обидва методи управління мають однаковий за модулем, але протилежний за знаком вплив на режим напруги при перехідних процесах, що визначає різницю їх впливу на систему.

Негативний контролюючий ефект батареї конденсатора може мати несприятливий вплив на режим передачі. При зниженні напруги потужність, що виробляється батареєю конденсатора, зменшується пропорційно квадрату напруги, що може привести до нестачі реактивної потужності в блоці живлення і подальшого зниження напруги.

Керуючий вплив понижуючого трансформатора позитивний і дорівнює 2. Це означає, що зміна напруги в мережі на 1% призводить до зміни споживання реактивної потужності на 2%. Через це позитивний керуючий вплив понижуючого трансформатора надає подвійний вплив на режим напруги в передачі: позитивне, що сприяє стабілізації напруги, і негативний, що перешкоджає зворотному регулюванню напруги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Khersonsky Y., Islam M., Peterson K. Challenges of Connecting Shipboard Marine Systems to Medium Voltage Shoreside Electrical Power. IEEE Transactions on Industry Applications. 2007. Vol. 43, no. 3. P. 838–844. URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2007.895810> (date of access: 02.02.2024).
2. A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems / S. Castellan et al. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 96. P. 306–323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.040> (date of access: 02.02.2024).

3. Lashway C. R., Elsayed A. T., Mohammed O. A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 141. P. 50–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.031> (date of access: 02.02.2024).
4. Ericson T. The ship power electronic revolution: Issues and answers. 2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. 2008. P. 1–11. DOI: 10.1109/PCICON.2008.4663984.
5. Mahdi H., Hoff B., Østrem T. Evaluation of Capacitive Power Transfer for Small Vessels Charging Applications. 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2020. P. 1605–1610.
6. Marcin Sedlak, Sebastian Stynski, Mariusz Malinowski, Marek Jasinski, Grzegorz Benysek, Robert Smolenski. Stress free shore to ship (S2SP) electrical power networks synchronization. 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). 2016. P. 244–249.
7. Kevin L. Peterson, Peniamin "Ben" Chavdarian, Mohammed Islam, Christopher Cayan. State of Shore Power Standards for Ships. 2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. 2007. P. 1–6.
8. Terry Ericson. Engineering Total Electric Ship. 2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. 2007. P.1-6.
9. Zhang H., Lu F. Feasibility Study of the High-Power Underwater Capacitive Wireless Power Transfer for the Electric Ship Charging Application. *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 14-16 Aug. 2019. P. 231–235.
10. Tamura M., Naka Y., Murai K. Design of Capacitive Coupler for Wireless Power Transfer Under Fresh Water Focusing on kQ Product. *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, 10-15 June 2018. P. 1257–1260.
11. Tamura M., Naka Y., Murai K., Nakata T. Design of a Capacitive Wireless Power Transfer System for Operation in Fresh Water. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66, no. 12. P. 5873–5884.
12. Zhang H., Lu F., Hofmann H., Liu W., Mi C. C. Six-Plate Capacitive Coupler to Reduce Electric Field Emission in Large Air-Gap Capacitive Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33, no. 1. P. 665–675.

REFERENCES

1. Khersonsky, Y., Islam, M., & Peterson, K. (2007). Challenges of Connecting Shipboard Marine Systems to Medium Voltage Shoreside Electrical Power. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(3), 838–844. <https://doi.org/10.1109/tia.2007.895810>
2. Castellan, S., Menis, R., Tessarolo, A., Luise, F., Piccolo, A., Sulligoi, G., & Bosich, D. (2018). A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96, 306–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.040>
3. Lashway, C. R., Elsayed, A. T., & Mohammed, O. A. (2016). Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads. *Electric Power Systems Research*, 141, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.031>
4. Ericson, T. (2008). The ship power electronic revolution: Issues and answers. *2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1109/PCICON.2008.4663984>
5. Mahdi, H., Hoff, B., & Østrem, T. (2020). Evaluation of Capacitive Power Transfer for Small Vessels Charging Applications. *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 1605–1610).
6. Sedlak, M., Stynski, S., Malinowski, M., Jasinski, M., Benysek, G., & Smolenski, R. (2016). Stress free shore to ship (S2SP) electrical power networks synchronization. *2016 10th International*

Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (pp. 244–249).

7. Peterson, K. L., Chavdarian, P. "Ben", Islam, M., & Cayanan, C. (2007). State of Shore Power Standards for Ships. *2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference* (pp. 1–6).
8. Ericson, T. (2007). Engineering Total Electric Ship. *2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference* (pp. 1–6).
9. Zhang, H., & Lu, F. (2019). Feasibility Study of the High-Power Underwater Capacitive Wireless Power Transfer for the Electric Ship Charging Application. *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium* (pp. 231–235).
10. Tamura, M., Naka, Y., & Murai, K. (2018). Design of Capacitive Coupler for Wireless Power Transfer Under Fresh Water Focusing on kQ Product. *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium* (pp. 1257–1260).
11. Tamura, M., Naka, Y., Murai, K., & Nakata, T. (2018). Design of a Capacitive Wireless Power Transfer System for Operation in Fresh Water. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(12), 5873–5884.
12. Zhang, H., Lu, F., Hofmann, H., Liu, W., & Mi, C. C. (2018). Six-Plate Capacitive Coupler to Reduce Electric Field Emission in Large Air-Gap Capacitive Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1), 665–675.

Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Dorofieieva Z.Ia., Lisovskyi S.V.

STUDYING THE CONTROLLING EFFECTS OF ELECTRICAL NETWORK EQUIPMENT ON THE VOLTAGE REGIME IN THE SHORE-TO-SHIP INTERACTION SYSTEM

The aim of the article is to study the controlling effects of electrical network equipment on the voltage regime in the shore-to-ship interaction system to improve the efficiency of power supply to a water transport enterprise. This goal is achieved by studying the scheme of substitution through power transmission sections in the shore-to-ship interaction system. It has been established that such sections can be considered, firstly, the section from the power supply to the transformer, secondly, the power step-down transformer, and thirdly, the standard marine electrical cable. It is proved that in the system of interaction between the shore and the ship, the capacitor bank and step-down transformer play an important role in managing reactive power. The capacitor bank compensates for the reactive power in the grid, and the step-down transformer affects the control of reactive power. Both control methods have the same modulus, but opposite sign, influence on the voltage regime during transients, which determines the difference in their impact on the system. The most significant result is the development of substitution schemes through power transmission sections in the shore-to-ship interaction system, considering the proposed equations for describing the control influences of electrical equipment of the power grid. It is determined that the negative impact controlled by a capacitor bank can adversely affect the mode of electricity transmission. A voltage reduction leads to a decrease in the power generated by the capacitor bank in proportion to the square of the voltage, which can lead to insufficient reactive power in the power system and a further voltage reduction. Controlling the step-down transformer has a positive effect. This means that a 1% change in the mains voltage causes a 2% change in reactive power consumption. Thus, the control influence of the step-down transformer has a double effect on the voltage regime in the transmission: positive, which contributes to voltage stabilisation, and negative, which prevents reverse voltage regulation.

Keywords: *controlling influence, electrical equipment, electrical network, voltage regime, shore-to-ship interaction system, circuit, feeder*

Трофименко І.В., Пліта Л.Л., Федунів В.М., Іваненко В.М.

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ЙМОВІРНІСНОЇ ГРАФІЧНОЇ МОДЕЛІ НАВІГАЦІЙНОЇ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ

Метою статті є розробка методики побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах. Поставлена мета досягається шляхом аналізу особливостей математичного апарату байєсівської мережі та нотації схеми функціональної цілісності; визначення основних подій для побудови графу байєсівської мережі для навігаційного оцінювання безпеки плавання та відповідних математичних виразів. Встановлено, що, незважаючи на значні зусилля удосконалення організаційно-технічних заходів для забезпечення безпеки судноплавства, рівень навігаційних аварій залишається високим. Існує протиріччя між ростом вимог до безпеки судноплавства та реальним станом речей. Одним з головних факторів, що перешкоджає вирішенню питань, пов'язаних з навігаційною безпекою плавання, є відсутність формальних методів для опису процесу судноплавства. Це пояснюється труднощами у моделюванні поведінки складних організаційно-технічних систем судноплавства в імовірнісному просторі станів, оскільки вплив на процес судноплавства є стохастичним, та обмеженнями теоретичного розуміння у цій області. У результаті виникають складнощі при створенні моделей навігаційних ризиків, що можуть бути використані для комплексної оцінки навігаційної безпеки у рамках складних організаційно-технічних систем судноплавства. Розв'язання цих проблем дозволило б застосовувати формальні методи для управління навігаційними ризиками, оцінки значущості компонентів системи та їхнього впливу на загальну величину ризиків. Найбільш суттєвим результатом є методика побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах з використанням математичного апарату теорії байєсівських мереж і нотації схеми функціональної цілісності. Дослідження показали, що можна використовувати основні риси байєсівських мереж та логіко-імовірнісного методу для математичного опису організаційно-технічних систем управління суднами. Для опису складних організаційно-технічних систем судноводіння можна застосовувати простір імовірнісних подій та аксіоматику Колмогорова разом з правилами булевої алгебри логіки. Цей підхід дозволяє враховувати особливості та цілісність системи «судно-судноводій-середовище» при оцінюванні навігаційних ризиків.

Ключові слова: судноплавство, навігаційна оцінка, безпека плавання, ймовірнісна графічна модель, байєсівська мережа, схема функціональної цілісності.

Постановка проблеми. У світлі важливості водного транспорту у теперішній час вживаються значні заходи для підвищення безпеки плавання, особливо в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах. Одними з найбільш значущих заходів є перегляд існуючих організаційно-технічних вимог, що регулюють безпеку, а також прийняття нових вимог. Додатково спостерігається помітне поліпшення систем забезпечення безпеки плавання в навігаційному плані. Розвиток супутникової навігації та комп'ютерних технологій надав можливість для створення нових систем судноводіння, серед яких особливе місце посідають автоматизовані ідентифікаційні системи, що істотно поліпшили огляд надводної обстановки. Крім того, системи управління рухом суден, що дають змогу безперервного контролю за станом судноплавства в районі підхідних шляхів до морських портів, набули

широкого розвитку.

Незважаючи на значні зусилля з удосконалення організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення навігаційної безпеки судноплавства, рівень навігаційних аварій залишається високим. Існує об'єктивне протиріччя між постійно зростаючими вимогами до безпеки судноводіння та його реальним станом. Відсутність формальних методів опису процесу судноводіння є однією з головних причин, що перешкоджають розв'язанню багатьох питань, пов'язаних із навігаційною безпекою плавання. Це пов'язано, зокрема, з труднощами опису поведінки складної організаційно-технічної системи судноводіння в імовірнісному просторі станів, спричиненими стохастичним характером чинників, що впливають на процес судноводіння, та обмеженнями теоретичного розуміння. Тобто, виникають складнощі під час визначення моделей навігаційних ризиків, що можуть використовуватися для комплексної оцінки навігаційної безпеки в рамках якісно складної організаційно-технічної системи судноводіння. Розв'язання цих труднощів дало б змогу застосовувати формальні методи для управління навігаційними ризиками, оцінки значущості компонентів системи та їхнього впливу на загальну величину ризиків. У зв'язку з цим, наявність протиріч між вимогами до навігаційної безпеки і реальним рівнем аварійності на флоті робить цю статтю актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття [1] спрямована на вивчення сучасних проблем електронної навігації та оцінку відповідних поправок, якщо технологія автономних суден набуде значного поширення в найближчому майбутньому. Системи керування суднами та морський зв'язок мають важливе значення, а надсилання й отримання сигналів тривоги мають вирішальне значення для сучасної судової навігації. В останні десятиліття для підвищення безпеки судноплавства з'явилося багато інформаційних систем визначення місця розташування і судноплавства: GPS, Loran-C і Decca. Інші системи, зокрема VHF і Inmarsat, були розроблені для підвищення ефективності морського зв'язку на борту і передавання даних про ризики та безпеку. Крім того, для безпечної навігації необхідні такі системи, як Navtex, EGS, DSC, Epirb та ін.

У роботі [2] досліджується безпека безпілотних надводних апаратів (БНА), що активно розвиваються. Для практичного використання БНА необхідно забезпечити безпеку, не допускаючи зіткнень із кораблями загального призначення. З цією метою БНА повинні уникати зустрічних суден відповідно до міжнародних правил запобігання зіткненням у морі (МППСС). У статті пропонується алгоритм запобігання зіткненням БНА з суднами, що протистоять, на основі правил МППСС. Пропонований алгоритм прогнозує небезпечні ситуації на основі відстані до найближчої точки зближення і часу до найближчої точки зближення. Це дозволяє БНА уникати інших суден на основі підходу з динамічним вікном (DWA). DWA було покращено відповідно до МППСС, реалізовано моделювання та виконано порівняння стандартного DWA з DWA, сумісного з МППСС (CCDWA), запропонованим у цій статті.

У статті [3] з урахуванням сучасних тенденцій розвитку ергатичних морських транспортних систем визначено фактори впливу штурмана на процеси управління судном. У рамках дослідницької гіпотези для підвищення безпеки судноплавства необхідне застосування прогнозних моделей інтелектуального аналізу даних і автоматизованого управління суднами. У роботі запропоновано схему ергатичної системи керування судном і модель виявлення впливу штурманського «людського фактору» під час плавання. У рамках моделі, заснованої на принципах навігаторських дерев рішень, застосовується прогнозування виникнення критичної ситуації засобами інтелектуального аналізу даних з урахуванням ідентифікаторів. За результатами прогнозу розроблено метод оптимального керування судном у критичних ситуаціях, який спрацьовує у вузлах дерева рішень штурмана, що знижує ймовірність критичного впливу на керування судном. Запропоновані підходи пройшли апробацію в науково-дослідній лабораторії «Розроблення систем підтримки ухвалення рішень, ергатичних і автоматизованих систем керування суднами». Використання навігаційного тренажера Navi Trainer 5000 (Wärtsilä Corporation, Фінляндія) і моделювання системи управління безпекою мореплавства у критичних ситуаціях підтвердили свою ефективність. У результаті тестування встановлено, що активація системи дала змогу знизити ймовірність виникнення критичних

ситуацій на 18-54%. В 11% випадків система переводила процеси керування судном в автоматичний режим і, як наслідок, знижувала ризик виникнення аварійних ситуацій. Використання засобів автоматизованого інтелектуального аналізу даних дало змогу нейтралізувати негативний вплив «людського чинника» судноводія і скоротити середній час маневрування під час плавання судна до 23%.

У роботі [4] визначено, що відстеження шляху і запобігання зіткненням, чи то для безпілотних надводних суден, чи то для інших автономних транспортних засобів, є двома фундаментальними проблемами наведення в робототехніці. Протягом багатьох десятиліть вони були предметом академічного вивчення, що призвело до величезної кількості запропонованих підходів. Однак здебільшого їх розглядали як окремі проблеми і зазвичай покладалися на нелінійні моделі із параметрами, які можна визначити тільки експериментально. Зростання глибокого навчання з підкріпленням в останні роки пропонує альтернативний підхід: наскрізне вивчення оптимальної політики керівництва з нуля за допомогою підходу, що ґрунтується на пробах і помилках. У цій статті досліджено потенціал Proximal Policy Optimization, алгоритм глибокого навчання з підкріпленням, що демонструє сучасну продуктивність у завданнях безперервного управління, стосовно двоцільової задачі управління автономним надводним транспортним засобом згідно з МППСС таким чином, щоб він слідував заздалегідь відомим бажаним шляхом, уникаючи при цьому зіткнень з іншими суднами на цьому шляху. Ґрунтуючись на високоточних даних про морське дно і даних стеження АІС у Тронхейм-фіорді, вході в Норвезьке море, оцінено роботу навченого агента у складних динамічних сценаріях реального світу (неоднорідний морський рельєф під час складних, але реалістичних зіткнень із суднами), де кінцевий успіх агента залежить від його здатності орієнтуватися в нестандартних умовах.

У статті [5] зазначено, що найважливішою глобальною проблемою, яку розв'язує сьогодні вся світова спільнота, є забезпечення сталого розвитку людства. Водночас сталий розвиток неможливий як система, що слугує для задоволення господарських, культурних, наукових, рекреаційних та інших потреб людини без забезпечення безпеки. Важливою умовою ефективного функціонування судноплавства є забезпечення його безпеки. «Приписний» підхід до забезпечення безпеки мореплавства, який застосовують у теперішній час у світовій морській галузі, ґрунтується на багаторічному досвіді та результатах розслідування судових пригод. Таким чином, цей підхід відіграв велику роль у зменшенні кількості аварій на морі. З ухваленням Міжнародного кодексу з управління безпекою вся діяльність, пов'язана з розв'язанням проблем безпеки мореплавства, була переведена на більш високий якісний рівень. Дедалі більшого значення набувають пошук і розробка нових підходів і методів запобігання аваріям суден під час їх експлуатації. Однак концепція морської безпеки ще не сформована і не описана. Стаття містить короткий огляд основних положень Концепцій безпеки мореплавства, які сприяють зниженню кількості аварій та інцидентів на морі.

Метою статті є розробка методики побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах.

Основні результати дослідження. Як імовірнісну графічну модель (ІГМ) навігаційного оцінювання безпеки плавання у статті запропоновано використовувати байєсівську мережу, що являє собою множину змінних й їхніх імовірнісних залежностей за Байєсом [6 - 9].

Формально, байєсівська мережа – це орієнтований ациклічний граф, кожній вершині якого відповідає випадкова змінна, а дуги графа кодують відносини умовної незалежності між цими змінними. Вершини можуть представляти змінні будь-яких типів, бути зваженими параметрами, прихованими змінними або гіпотезами.

За графічну нотацію ІГМ використовуємо схему функціональної цілісності, яка являє собою логічно універсальний графічний засіб структурного представлення досліджуваних властивостей системних об'єктів. За побудовою апарат схеми функціональної цілісності реалізує всі можливості алгебри логіки у функціональному базисі «І», «АБО» і «НІ». Ці схеми дають змогу коректно представляти традиційні види структурних схем (блок-схеми, дерева

відмов, дерева подій, графи зв'язності з циклами) і принципово новий клас немонотонних (некогерентних) структурних моделей різних властивостей досліджуваних систем. Нині схеми функціональної цілісності застосовують для побудови структурних схем для розрахунку показників надійності, стійкості, живучості, технічного ризику, реальної ефективності систем.

Усі образотворчі засоби розглянутої ІГМ можна представити одним узагальненим фрагментом на рис. 1, де у загальному вигляді наведено всі можливі варіанти графічного подання умов функціонального забезпечення вершини, які існують у схемах функціональної цілісності. Кожен елемент ІГМ графічно являє одну з логічних операцій «І», «АБО», «НІ», що дає змогу відображати всі умови функціонування елементів системи, які можна представити засобами алгебри логіки.

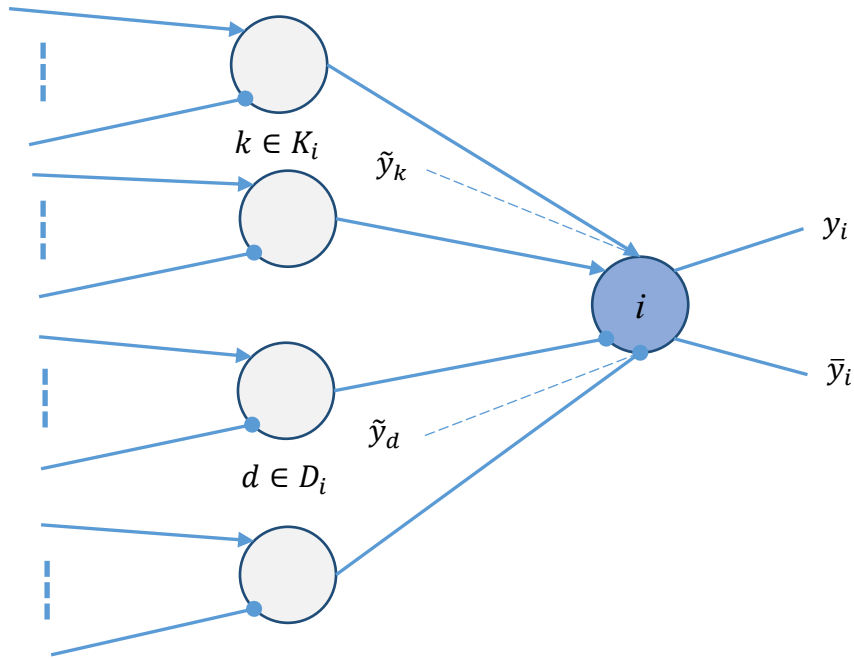


Рисунок 1 – Узагальнений фрагмент ВІГМ у нотації схеми функціональної цілісності

Узагальнені логічні рівняння, що відповідають різним окремим фрагментам рис. 1 подано нижче. Для прямої вихідної інтегративної функції маємо

$$y_i = x_i(V_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(V_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \quad (1)$$

де i у цьому випадку – функціональна вершина;

$$y_i = (V_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(V_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \quad (2)$$

де i у цьому випадку – фіктивна вершина.

Для інверсної вихідної інтегративної функції

$$\bar{y}_i = \bar{x}_i \vee (П_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(П_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \quad (3)$$

де i у цьому випадку – функціональна вершина;

$$\bar{y}_i = (П_{d \in D_i} \tilde{y}_d)(П_{k \in K_i} \tilde{y}_k), \quad (4)$$

де i у цьому випадку – фіктивна вершина.

Перехід від логічного рівняння функціонування якісно складної системи судноводіння до ймовірнісної функції забезпечується використанням аксіом Колмогорова:

1. Значення ймовірності обмежено $0 \leq P(x_i) \leq 1$.
2. Безумовна істинність висловлювань має ймовірність 1.
3. Ймовірність диз'юнкцій задається виразом

$$P(x_i \vee x_j) = P(x_i) + P(x_j) - P(x_i x_j).$$

Семантика байєсівських мереж спирається на два способи опису сутності мереж. Мережу слід вважати одним із подань спільного розподілу ймовірностей подій, включених у мережу. Також вона має розглядатися як опис сукупності тверджень про умовну незалежність елементів мережі. Математично це твердження описується так:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod P(X_i / \text{parents}(X_i)). \quad (5)$$

Крім безпосередніх ймовірностей звершення вихідних подій апарат логіко-ймовірнісного моделювання передбачає проведення аналізу ролі окремих елементів. Оцінку може бути виконано як на підставі аналізу відповідного логічного рівняння, так і методом аналізу ймовірнісної функції.

Під час аналізу логічного рівняння використовують поняття булевої різниці

$$\Delta_{x_i} Y = Y(x_1, \dots, x_m) \oplus Y(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m), \quad (6)$$

де $Y(x_1, \dots, x_m)$ – функція алгебри логіки;

$Y(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$ – функція алгебри логіки, в якій аргументи x_i замінені їхніми запереченнями $\bar{x}_i$.

Для оцінки одночасного і різночасового впливу двох аргументів на систему використовуються відповідно подвійна (7) і дворазова (8) булева різниця

$$\Delta_{x_i x_j} Y = \begin{vmatrix} x_i x_j & \left(Y_{11}^{(i,j)} \oplus Y_{00}^{(i,j)} \right) \\ \bar{x}_i \bar{x}_j & \left(Y_{11}^{(i,j)} \oplus Y_{00}^{(i,j)} \right) \\ \bar{x}_i x_j & \left(Y_{01}^{(i,j)} \oplus Y_{10}^{(i,j)} \right) \\ x_i \bar{x}_j & \left(Y_{01}^{(i,j)} \oplus Y_{10}^{(i,j)} \right) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

де $Y_{11}^{(i,j)}$ – функція, отримана з вихідної заміною аргументів x_i та x_j на одиниці;

$Y_{01}^{(i,j)}$ – функція, отримана з вихідної заміною аргументів x_i на одиницю, а x_j – на нуль;

$Y_{10}^{(i,j)}$ – функція, отримана з вихідної заміною аргументів x_i на нуль, а x_j – на одиницю;

$Y_{00}^{(i,j)}$ – функція, отримана з вихідної заміною аргументів x_i та x_j на нулі.

При цьому

$$\Delta \Delta_{x_i x_j} Y = \begin{vmatrix} Y_{11}^{(i,j)} & Y_{01}^{(i,j)} & Y_{10}^{(i,j)} \\ Y_{01}^{(i,j)} & Y_{01}^{(i,j)} & Y_{10}^{(i,j)} \\ Y_{10}^{(i,j)} & Y_{10}^{(i,j)} & Y_{10}^{(i,j)} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Основними показниками ролі аргументу в системі на основі аналізу ймовірнісних функцій є значущість і внесок.

Значущість ζ окремого елемента розглянутої системи визначається виразом

$$\zeta = \frac{P_Y}{P_{X_{i=1}}} - \frac{P_Y}{P_{X_{i=0}}}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

У виразі (9) $\frac{P_Y}{P_{X_{i=1}}}$ – це значення ймовірності звершення вихідної події системи за абсолютної надійності елемента x , а $\frac{P_Y}{P_{X_{i=0}}}$ – при достовірній відмові елемента x на розглянутому інтервалі часу.

У реальних системах значення ймовірності звершення окремого елемента змінюватимуться стосовно якогось їхнього наявного значення. Оцінити таку зміну коректно можливо за допомогою позитивного β_i^+ і негативного β_i^- внесків елементів

$$\beta_i^+ = \frac{P_Y}{P_{X_{i=1}}} - P_Y,$$

$$\beta_i^- = P_Y - \frac{P_Y}{P_{X_{i=0}}}.$$

З урахуванням практики управління судном, граф байєсівської мережі ІГМ для навігаційного оцінювання безпеки плавання має включати такі основні події:

X_1 – подія, що визначає здатність вахтового помічника утримувати судно на осі суднового ходу;

X_2 – подія, що визначає можливість вахтового помічника визначати місце судна;

X_3 – подія, що визначає керованість судна з урахуванням його технічного стану;

X_4 – подія, що визначає мінливість маневреної смуги руху судна під впливом гідрометеорологічних факторів;

X_5 – подія, що визначає мінливість габаритів суднового ходу за маршрутом плавання;

X_6 – подія, що характеризує наявність візуальних полів елементів стаціонарного та плавучого огороження системи навігаційного обладнання району плавання;

X_7 – подія, що характеризує наявність систем радіолокаційних орієнтирів і сукупності полів відбитих РЛС-сигналів;

X_8 – подія, що характеризує повторюваність сприятливих умов видимості;

X_9 – подія, що характеризує мінливість течій у районі плавання.

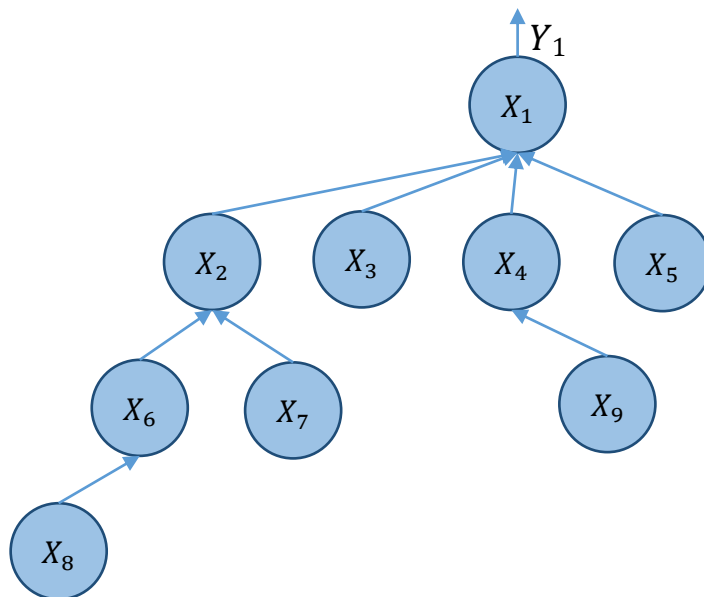


Рисунок 2 – Граф ІГМ для навігаційної оцінки безпеки плавання

Логічне рівняння звершення вихідної події набуває вигляду

$$Y_1 = ((X_8 X_6 \vee X_7) \wedge X_2 \vee X_3 \vee X_5 \vee X_4 X_9) \vee X_1.$$

Загальний вираз для навігаційного ризику при судноплавстві, який проявляється в разі не здійснення хоча б однієї з часткових подій, матиме вигляд

$$P_{risk} = Q_9 + Q_4P_9 + P_4Q_7P_9 + P_4P_7Q_8P_9 + P_4Q_6P_7P_8P_9 + Q_2P_4P_6P_7P_8P_9 + P_2Q_3P_4P_6P_7P_8P_9 + P_2P_3P_4Q_5P_6P_7P_8P_9 + Q_1P_2P_3P_4P_5P_6P_7P_8P_9, \quad (10)$$

де $P_i, i = 1 - n$ – ймовірності здійснення відповідних подій;

$Q_i, i = 1 - P_i$ – ймовірності звершення зворотних подій.

Представляє науковий і практичний інтерес отримання кількісних значень виразу (10). Для цього використовується рівнопараметричний метод чисельного аналізу, за якого часткові значення ймовірностей появи подій, що включені до логіко-ймовірнісного графа системи, набувають однакових значень. Результати обчислень за виразом (10) наведено на рис. 3.

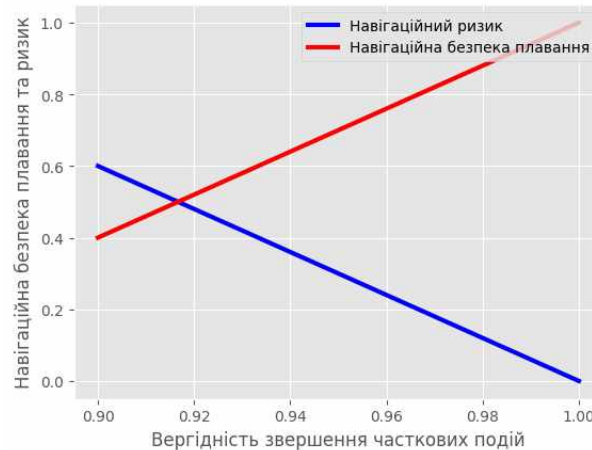


Рисунок 3 – Залежність навігаційної безпеки плавання і ризику від ймовірності звершення часткових подій

Отримані результати моделювання показують, що судноводій має розв'язувати задачі з оцінювання обстановки та керування судном з ймовірністю не гірше 0,99. Система навігаційного обладнання району плавання має забезпечувати сприятливі умови для координування суден з ймовірністю не гірше 0,95.

Висновки. У статті запропоновано методику побудови ймовірнісної графічної моделі навігаційної оцінки безпеки плавання під час керування суднами в обмежених умовах як на морських районах, так і на внутрішніх водних шляхах з використанням математичного апарату теорії байєсівських мереж і нотації схеми функціональної цілісності. Було продемонстровано, що основні характеристики байєсівських мереж і логіко-ймовірнісного методу можуть бути використані для математичного опису організаційно-технічних систем управління суднами. Для опису якісно складних організаційно-технічних систем судноводіння можна використовувати простір ймовірнісних подій та аксіоматику Колмогорова в поєднанні з правилами булевої алгебри логіки. Цей підхід дає змогу враховувати особливості та цілісність системи «судно-судноводій-середовище» під час оцінювання навігаційних ризиків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Polemis D., Darousos E. F., Boviatsis M. A Theoretical Analysis of Contemporary Vessel Navigational Systems: Assessing the Future Role of the Human Element for Unmanned Vessels. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16, no. 4. P. 637–646. URL: <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.05> (date of access: 02.02.2024).
2. Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle / H.-G. Kim et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 8. P. 863. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9080863> (date of access: 02.02.2024).

3. Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means / P. Nosov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, no. 9 (110). P. 55–68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237> (date of access: 02.02.2024).
4. COLREG-Compliant Collision Avoidance for Unmanned Surface Vehicle Using Deep Reinforcement Learning / E. Meyer et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 165344–165364. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022600> (date of access: 02.02.2024).
5. Torskiy V., Topalov V. P., Chesnokova M. Conceptual Grounds of Navigation Safety. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 79–82. URL: <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.08> (date of access: 02.02.2024).
6. Heckerman D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Learning in Graphical Models*. Dordrecht, 1998. P. 301–354. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9_11 (date of access: 02.02.2024).
7. Robinson R. W. Counting unlabeled acyclic digraphs. *Lecture Notes in Mathematics*. Berlin, Heidelberg, 1977. P. 28–43. URL: <https://doi.org/10.1007/bfb0069178> (date of access: 02.02.2024).
8. Tversky A., Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Judgment under Uncertainty*. 1982. P. 3–20. URL: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511809477.002> (date of access: 02.02.2024).
9. Chow C., Liu C. Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1968. Vol. 14, no. 3. P. 462–467. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.1968.1054142> (date of access: 02.02.2024).
10. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning / O. Vinyals et al. *Nature*. 2019. Vol. 575, no. 7782. P. 350–354. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z> (date of access: 02.02.2024).
11. Taming an Autonomous Surface Vehicle for Path Following and Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning / E. Meyer et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 41466–41481. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2976586> (date of access: 02.02.2024).
12. Implementation Matters in Deep Policy Gradients: A Case Study on PPO and TRPO. *Under review as a conference paper at ICLR 2019* / Logan Engstrom, Andrew Ilyas, Shibani Santurkar, Dimitris Tsipras, Firdaus Janoos. 2019. URL: <https://openreview.net/forum?id=r1etN1rtPB> (date of access: 02.02.2024).

REFERENCES

1. Polemis, D., Darousos, E. F., & Boviatsis, M. (2022). A Theoretical Analysis of Contemporary Vessel Navigational Systems: Assessing the Future Role of the Human Element for Unmanned Vessels. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(4), 637–646. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.05>
2. Kim, H.-G., Yun, S.-J., Choi, Y.-H., Ryu, J.-K., & Suh, J.-H. (2021). Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 863. <https://doi.org/10.3390/jmse9080863>
3. Nosov, P., Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., & Kruglyj, D. (2021). Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9 (110)), 55–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>
4. Meyer, E., Heiberg, A., Rasheed, A., & San, O. (2020). COLREG-Compliant Collision Avoidance for Unmanned Surface Vehicle Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 8, 165344–165364. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022600>
5. Torskiy, V., Topalov, V. P., & Chesnokova, M. (2016). Conceptual Grounds of Navigation Safety. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(1), 79–82. <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.08>
6. Heckerman, D. (1998). A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Learning in Graphical Models* (pp. 301–354). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5014-9_11

7. Robinson, R. W. (1977). Counting unlabeled acyclic digraphs. *У Lecture Notes in Mathematics* (pp. 28–43). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0069178>
8. Tversky, A., & Kahneman, D. (1982). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *In Judgment under Uncertainty* (pp. 3–20). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511809477.002>
9. Chow, C., & Liu, C. (1968). Approximating discrete probability distributions with dependence trees. *IEEE Transactions on Information Theory*, 14(3), 462–467. <https://doi.org/10.1109/tit.1968.1054142>
10. Vinyals, O., Babuschkin, I., Czarnecki, W. M., Mathieu, M., Dudzik, A., Chung, J., Choi, D. H., Powell, R., Ewalds, T., Georgiev, P., Oh, J., Horgan, D., Kroiss, M., Danihelka, I., Huang, A., Sifre, L., Cai, T., Agapiou, J. P., Jaderberg, M., ... Silver, D. (2019). Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning. *Nature*, 575(7782), 350–354. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z>
11. Meyer, E., Robinson, H., Rasheed, A., & San, O. (2020). Taming an Autonomous Surface Vehicle for Path Following and Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 8, 41466–41481. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2976586>
12. Engstrom, L., Ilyas, A., Santurkar, S., Tsipras, D., & Janoos, F. (2019). *Implementation matters in deep policy gradients: A case study on PPO and TRPO* [Preprint]. OpenReview. <https://openreview.net/forum?id=r1etN1rtPB>

Trofymenko I.V., Plita L.L., Fedunov V.M., Ivanenko V.M.

A METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING A PROBABILISTIC GRAPHICAL MODEL OF NAVIGATIONAL SAFETY ASSESSMENT

The purpose of the article is to develop a methodology for constructing a probabilistic graphical model of navigational safety assessment when navigating ships in limited conditions both in marine areas and inland waterways. This goal is achieved by analysing the features of the mathematical apparatus of the Bayesian network and notation of the functional integrity scheme, determining the main events for building a graph of the Bayesian network for navigational safety assessment and the corresponding mathematical expressions. It is established that, despite significant efforts to improve organisational and technical measures to ensure navigation safety, the level of navigation accidents remains high. There is a contradiction between the growth of requirements for shipping safety and the actual situation. One of the main factors hindering the resolution of issues related to navigational safety is the lack of formal methods for describing the navigation process. This is due to the difficulties in modelling the behaviour of complex organisational and technical shipping systems in the probabilistic state space, as the impact on the shipping process is stochastic, and the limitations of theoretical understanding in this area. As a result, there are difficulties in creating models of navigation risks that can be used for a comprehensive assessment of navigation safety within complex organisational and technical shipping systems. The solution to these problems would allow the use of formal methods for managing navigation risks, assessing the significance of system components and their impact on the overall risk. The most significant result is a methodology for constructing a probabilistic graphical model of navigational safety assessment when navigating ships in restricted conditions both in offshore areas and inland waterways using the mathematical apparatus of Bayesian network theory and functional integrity scheme notation. The research has shown that it is possible to use the main features of Bayesian networks and the logical-probabilistic method for the mathematical description of organisational and technical ship management systems. The space of probabilistic events and Kolmogorov's axiomatics together with the rules of Boolean logic algebra can be used to describe complex organisational and technical systems of ship management. This approach makes it possible to consider the peculiarities and integrity of the «ship-shipman-environment» system when assessing navigation risks.

Keywords: shipping, navigation assessment, navigation safety, probabilistic graphical model, Bayesian network, functional integrity scheme.

Мельник О.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ СУДНОВИХ ОПЕРАЦІЙ

У статті розглянуто застосування системного підходу до аналізу безпеки експлуатації технічних засобів при проведенні суднових операцій. При дослідженні безпеки проведення суднових операцій виділено три групи показників: показники якості технічної системи (готовність до експлуатації), урахування зовнішніх факторів (природні умови, метеорологічні дані), та якість експлуатації, яка залежить від підготовки технічного персоналу. Для вирішення задачі оцінки ризику та безпеки експлуатації технічних засобів при проведенні суднових операцій запропоновано декілька основних принципів, в основі яких запропоновано математичні моделі готовності до експлуатації технічних засобів системи суднових операцій з урахуванням їх випадкових і невизначених параметрів. Було отримано функцію готовності, яка є комплексним показником надійності, оскільки залежить від показників безвідмовності та показників відновлюваності технічної системи. Запропоновано допоміжні заходи по забезпеченню експлуатаційної надійності, які дозволять понизити рівень ризиків, що дозволить запобігати аваріям при проведенні суднових операцій.

Ключові слова: безпека, суднові операції, технічні засоби, готовність, безвідмовність, , технічний стан, ймовірність безвідмовної роботи, засіб водного транспорту, експлуатаційна надійність.

Постановка проблеми. Безпека проведення суднових операцій - один із основних факторів безаварійної роботи суден на водному транспорті. Готовність до експлуатації технічних систем забезпечується експлуатаційною надійністю технічних засобів проведення суднових операцій. Отже, дослідження готовності до експлуатації систем методом математичного моделювання, є одним з головних завдань забезпечення надійності як безпекової складової проведення суднових операцій.

Аналіз останніх досліджень. Питаннями забезпечення експлуатаційної надійності технічних засобів присвячено роботи авторів В.С.Канарчука, С.К.Полянського, М.М. Дмітрієва. Але недостатньо уваги приділялось дослідженню готовності до експлуатації технічних засобів системи суднових операцій.

Мета дослідження. У статті запропоновано математичну модель аналізу експлуатаційної надійності технічних засобів при проведенні суднових операцій, яка дозволяє враховувати їхню структуру, оцінити вплив умов експлуатації, ефективність дій обслуговуючого персоналу при відновленні втраченої працездатності.

Основні результати дослідження. Застосування системного підходу до аналізу безпеки експлуатації технічних засобів при проведенні суднових операцій передбачає вибір сукупності показників якості елементів систем та формулювання критеріїв ефективності та безпеки функціонування системи в реальних умовах (з урахуванням усіх аспектів: технічного, економічного, екологічного, соціального) [1].

На рис. 1 надана схема формування безпеки функціонування технічної системи.

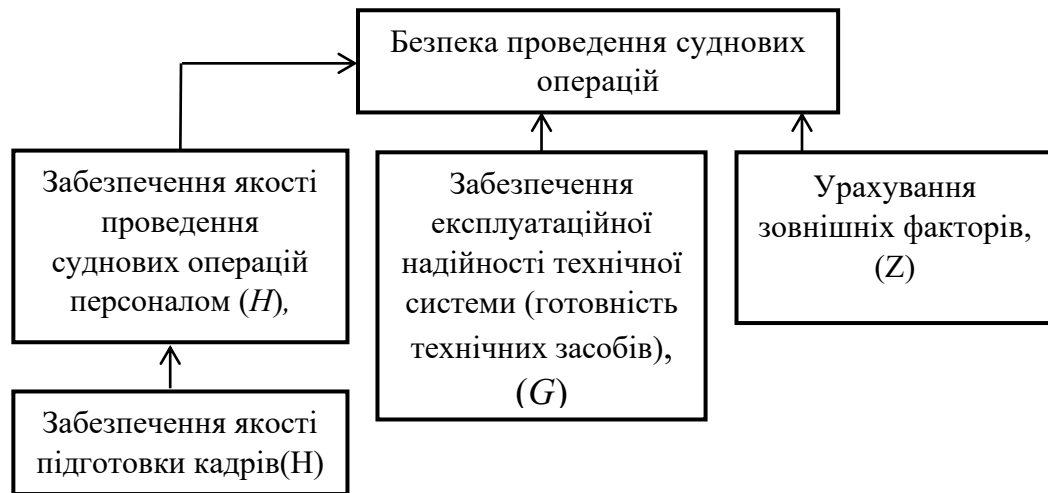


Рисунок 1– Схема формування безпеки проведення суднових операцій

Отже, при дослідженні безпеки проведення суднових операцій слід виділити три групи показників: показники якості технічної системи (готовність до експлуатації) (G), урахування зовнішніх факторів (природні умови, метеорологічні дані) (Z), та якість експлуатації, яка залежить від підготовки технічного персоналу (H). При цьому формалізований вираз критерія безпеки, аналогічно до критерію ефективності роботи [5], може бути представлено функціоналом безпеки B , який має наступний вигляд:

$$B = B[L(Z, G, H), C(G, H)], \quad (1)$$

де $L(Z, G, H)$ – рівень безпеки системи, оцінений за критеріями прийнятного ризику; $C(G, H)$ – витрати на забезпечення прийнятного рівня безпеки.

В якості підтвердження даної залежності (1) може виступати функціонал ефективності у вигляді

$$E = E(Z, G, H) \geq E^{\text{доп}}, \quad (2)$$

де $E^{\text{доп}}$ – мінімально допустиме значення функціоналу ефективності.

В якості критерію безпеки використовуються приведені витрати, що враховують витрати на всіх стадіях існування системи, то цільовою функцією системи має бути вираз, що описує мінімізацію збільшення витрат для забезпечення безпеки системи прийнятного рівня для фіксованих характеристик зовнішніх умов, тобто:

$$\min \Delta B = \min \frac{C(G, H)}{L(G, H)}. \quad (3)$$

при забезпеченні умови (1). Отже, завдання дослідження проблеми підвищення експлуатаційної безпеки системи зводиться до аналізу впливів на ΔB збільшень ΔG показників якості окремих елементів системи, що входять в множину G .

Для вирішення задачі оцінки ризику та безпеки експлуатації технічних засобів при проведенні суднових операцій можна виділити декілька основних принципів.

По-перше, процес проведення суднових операцій слід розглядати як систему, що складається з взаємозалежних технологічних ланок, до складу яких входять технічні засоби, задіяні в операції та існуючі зв'язки між ними.

По-друге, необхідно розробити набір моделей системи з урахуванням їх випадкових і невизначених параметрів і, що дуже важливо, систему реалізації цих моделей, що дозволяє за допомогою ряду формалізованих або неформалізованих процедур довести рішення до

кінцевого результату.

По-третє, слід розробити певну систему критеріїв оцінки стану системи, що дозволяє порівнювати можливі сценарії розвитку подій і приймати найбільш оптимальні рішення.

По-четверте, необхідно створення системи інформаційного забезпечення завдань, що виникають на всіх етапах існування об'єкта. І, нарешті, по-п'яте, створення системи прийняття рішень в процесі експлуатації об'єкта.

Природньо, що в основу такого роду досліджень закладається система моделей, які прогнозують стан об'єкта та його підсистем, вибір яких є ключовим моментом, що визначає достовірність отриманих результатів. При цьому використовуються не тільки наявні моделі обладнання, зовнішніх впливів, але і в разі необхідності створюються нові моделі, необхідні для завершення комплексного опису системи [2]. Всі використовувані методи прогнозування поведінки системи можна розділити на три основні групи:

- побудова моделей, тобто спеціальних об'єктів, що відтворюють істотні риси досліджуваних процесів за допомогою фізичного, математичного. та інших видів моделювання;

- використання експертних оцінок, які акумулюють досвід спеціалістів в даній області і використовують здатність людини робити прогнози на основі наявної інформації про поточний стан системи і характер розвитку її аналогів;

- екстраполяція результатів, отриманих в результаті статистичної обробки наявних даних по існуючим об'єктам.

Сукупність технічних засобів при проведенні судових операцій як об'єкт експлуатації є складною технічною системою, що складається з конструктивно оформлених елементів з різним рівнем надійності [3]. У процесі функціонування технічних засобів відбуваються зміни їх характеристик, параметрів, процеси старіння матеріалів, збої та відмови. Іншими словами, зміна станів технічної системи у часі, які умовно можна поділити на працездатні та непрацездатні (стани відмови). Працездатні стани характеризуються значеннями визначальних параметрів системи, що задовольняють вимоги технічної документації [4]. Крім цього, до працездатних станів можна відносити стани часткової працездатності, тобто при яких відбулося погіршення параметрів до рівня близького до гранично допустимого, але не перевищує його, або при яких після відмови основного елемента відбувається перехід на резервний елемент, при цьому спостерігається часткове витрачання ресурсу, але не виникає порушення працездатності всієї системи. Таким чином, технічна система може перебувати в кількох працездатних станах, кожен з яких характеризується своєю ефективністю, тобто ступенем пристосованості системи для виконання поставленої експлуатаційної задачі.

Зміна станів технічної системи визначається впливом зовнішнього середовища, процесом виникнення нештатних ситуацій, викликаних відмовами системи в цілому або її окремих частин, та керованим процесом проведення відновлювальних робіт, під якими розуміємо довільне, цілеспрямоване, передбачене заздалегідь або вимушене, несподіване втручання технічного персоналу у роботу всієї системи чи її окремих частин. Під це визначення підпадають зовнішні огляди, капітальний ремонт і навіть заміна технічної системи на нову, ідентичну.

Вплив зовнішнього середовища та процес виникнення нештатних ситуацій носять випадковий характер і не можуть бути визначені та передбачені однозначно, тому не можна заздалегідь знати, як розвиватиметься процес експлуатації у майбутньому. Отже, для адекватного аналізу надійності технічних засобів доцільно використати модель випадкового процесу [5]. Аналіз причин відмов технічних засобів при проведенні судових операцій показав, що в реальних умовах функціонування відмови технічних засобів визначаються відмовами елементів, що відбуваються як внаслідок впливу зовнішніх несприятливих факторів, так і внаслідок процесів старіння та зносу, що призводять до поступового зниження основних параметрів системи. Виходячи з цього, слід розглядати зміну показників надійності при спільному прояві раптових і поступових відмов. У цьому полягає неоднорідність випадкового процесу зміни станів технічної системи у часі.

Зміна станів технічної системи в часі визначається також цілеспрямованим (керованим) процесом проведення відновлювальних робіт, тобто процесом технічного обслуговування, який носить суб'єктивний характер (людина приймає рішення про те, коли і які відновлювальні роботи необхідно проводити), хоч і базується на об'єктивній інформації про стан системи. Приймаючи рішення про проведення тієї чи іншої відновлювальної роботи, терміни її початку та реалізуючи це рішення, технічна система переходить в новий стан. Функціонування технічних засобів даної суднової операції у часі має циклічний характер і після закінчення кожного циклу ситуація, яка може привести або не призвести до відмови, відновлюється. Основною кількісною характеристикою безвідмовної роботи прийнято вважати ймовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі часу, тобто ймовірність того, що напрацювання до першої відмови ξ_1 перевищує величину t [6].

Ймовірність безвідмовної роботи елемента на проміжку часу від 0 до t можна записати у вигляді *функції надійності*:

$$P(t) = P\{\xi_1 \geq t\} = 1 - F_1(t), \quad (4)$$

де ξ_1 – випадкова величина, що характеризує напрацювання елемента до першої відмови за певний проміжок часу;

$\xi_1(i)$ – реалізація випадкової величини ξ_1 для i -го елемента системи;

$F_1(t) = P\{\xi_1 < t\}$ – функція розподілу часу до першої відмови;

Відповідний статистичний показник (точкова оцінка) ймовірності безвідмовної роботи визначається як відношення числа елементів, що безвідмовно працювали до моменту часу t , до загального числа елементів, що працювали в початковий (нульовий) момент часу:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (5)$$

$n(t)$ – число елементів, що відмовили на момент часу t ; $N(t)$ – число працюючих елементів на момент часу t . $N(0)$ – число працюючих елементів в початковий (нульовий) момент часу

Оскільки відмова кожного з технічних засобів є випадковою незалежною подією, то ймовірність безвідмовної роботи технічної системи в цілому визначатиметься як добуток відповідних ймовірностей:

$$P(t) = \prod_{i=1}^3 P_i(t), \quad (6)$$

де $P_i(t)$ ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента,

$P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ – ймовірність того, що, за час t працюватиме безвідмовно 1-й, 2-й або 3-й елемент відповідно.

P_0, P_1, P_2, P_3 , – ймовірності того, що за час не відмовить жодний елемент (P_0), відмовить 1 або 2, або 3 елементи відповідно.

Для моделювання функції розподілу відмов ТЗ використаємо експоненційний розподіл з параметром λ : [7].

$$F_1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1 - e^{-\lambda t}, & t \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Параметр λ визначає інтенсивність відмов і статистично може бути оцінений як величина обернена до середнього часу безвідмовної роботи.

З формули (1) маємо, що *ймовірність відмови* на проміжку часу від 0 до t :

$$Q(t) = P\{\xi_1 < t\} = 1 - P(t) \quad (8)$$

З ймовірнісних міркувань розрахуємо частоту відмов ТЗ в залежності від часу t як функцію щільності розподілу ймовірностей відмов:

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (9)$$

Відповідно інтенсивність відмов технічних засобів в залежності від часу t визначимо наступним чином:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} \quad (10)$$

Відновлюваний об'єкт впродовж усього терміну служби може відмовити багато разів. Після кожної відмови робиться відновлення працездатності шляхом заміни елементів, що

відмовили, регулювання, ремонту, і об'єкт знову включається в роботу. Тому необхідно дослідити процес функціонування технічних засобів в період відновлення.

Моделювання процесу функціонування з врахуванням часу на відновлення. Процес функціонування відновлюваного об'єкта можна уявити послідовність випадкових інтервалів безвідмовної роботи (ξ_k) та просто (θ_k).

Для покращення процесу організації і планування суднових операцій запропоновано використовувати відносний коефіцієнт часу відновлення технічних засобів бункерування k_i , використання якого дозволить визначити ймовірність безвідмовної роботи та попередити аварійні ситуації.

$$Q(t) = 1 - P(t) - \int_0^t \lambda(\tau) \cdot p(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

Ймовірність того, що технічні засоби були відновлені і після того працювали деякий час можна визначити наступним чином:

$$Q(t) = 1 - P(t) - \sum_{k=1}^N \lambda(\tau_k) \cdot \Delta\tau \cdot p(t - \tau_k). \quad (12)$$

Визначимо функцію готовності $G(t)$ – ймовірність того, що в довільний момент часу t система буде знаходитись в робочому стані.

Розділимо інтервал $(0, t)$ на N неперекривних інтервалів довжиною $\Delta\tau$. Нехай C_k – це подія, яка полягає в тому, що технічна система була відновлена на інтервал $i \Delta\tau$ і працювала безвідмовно в інтервалі $(t - \tau_k - \Delta\tau, t - \tau_k)$.

Ймовірність цієї події дорівнює $\lambda(\tau_k) \cdot \Delta\tau \cdot p(t - \tau_k)$, де $\lambda(\tau_k)$ – параметр потоку відмов.

Використовуючи формулу повної ймовірності, отримуємо наступний вираз функції готовності:

$$G(t) = P(t) + \sum_{k=1}^N \lambda(\tau_k) \cdot \Delta\tau \cdot p(t - \tau_k). \quad (13)$$

Виконавши граничний перехід за умови $\max_k \Delta\tau_k \rightarrow 0$, отримаємо

$$G(t) = P(t) + \int_0^t \lambda(\tau) \cdot p(t - \tau) d\tau. \quad (14)$$

Функція готовності є комплексним показником надійності, оскільки залежить від показників безвідмовності та показників відновлюваності технічної системи [8].

Відповідно до обраної моделі аналізу експлуатаційної надійності як кількісний показник надійності виберемо коефіцієнт готовності ($KГ$) — ймовірність того, що об'єкт опиниться у працездатному стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається (профілактика чи технічне обслуговування). Коефіцієнт готовності є комплексним показником надійності, який характеризує безвідмовність та ремонтпридатність одночасно, та рекомендований для оцінки експлуатаційної надійності обладнання при виконанні суднових операцій. Для кількісної оцінки ймовірності реалізації станів складається система m звичайних лінійних диференціальних рівнянь Колмагорова-Чепмена першого порядку [9].

Таким чином, запропонована математична модель аналізу експлуатаційної надійності дозволяє враховувати структуру технічних засобів, що розглядаються, оцінити вплив умов експлуатації, ефективність дій обслуговуючого персоналу при відновленні втраченої працездатності.

Частоту виникнення аварійної ситуації при проведенні суднових операцій необхідно визначати, виходячи з конкретних умов. Необхідний рівень експлуатаційної надійності устаткування досягається як за рахунок забезпечення необхідної базової надійності в процесі проектування та виготовлення, так і експлуатації устаткування.

Процес забезпечення експлуатаційної надійності, зв'язаний з усуненням слабких місць, характеризується її підвищенням і послідовним збільшенням міжремонтних періодів устаткування. При цьому кожен черговий період розраховують, виходячи з аналізу надійності за минулий час експлуатації.

При розрахунку чергового міжремонтного періоду T_P задаються необхідною ймовірністю безвідмовної роботи устаткування P_{TP} до початку чергового ремонту. Ця ймовірність повинна

складати 0,8-0,85 у залежності від важливості устаткування в забезпеченні технологічного процесу. На підставі статистичних даних про відмовлення устаткування за попередній період експлуатації t_1 установлюють закон розподілу й оцінюють вид функції інтенсивності відмовлень $\lambda(f)$. Тоді імовірність безвідмовної роботи устаткування до моменту початку чергового ремонту можна представити у виді [10]:

$$P(t_1 + T_p) = \exp \left[- \int_0^{t_1 + T_p} \lambda(t) dt \right] \quad (15)$$

З огляду на те, що $P(t_1 + T_p) = P(t_1)P(T_p/t_1) = P_{TP}$, а також приймаючи допущення, що надійність устаткування після останнього ремонту перед планованим залишається такий же, як якби устаткування не відмовило, тобто $P(t_1) = 1$, то одержимо:

$$P(T_p/t_1) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_1 + T_p} \lambda(t) dt \right] \quad (16)$$

Виразення $P(T_p/t_1) = P_{TP}$, тому що імовірність безвідмовної роботи устаткування P_{TP} до початку чергового ремонту - це умовна імовірність безвідмовної роботи устаткування за умови, що по події періоду t_1 відмовлення не наступило, тобто що $P(t_1) = 1$.

Тоді вираження для визначення T_p може бути представлене у виді:

$$\int_{t_1}^{t_1 + T_p} \lambda(t) dt = -\ln P_{TP} \quad (17)$$

При експонентному законі розподілу відмовлень ($\lambda = \text{const}$) вираження для T_p приймає вид:

$$T_p = -\frac{1}{\lambda} \ln P_{TP} \quad (18)$$

Потрібний рівень надійності устаткування забезпечують:

- а) удосконаленням методів експлуатації обладнання;
- б) технічним обслуговуванням та ремонтом ;
- в) шляхом усунення недоліків на основі зібраної та обробленої інформації щодо стану обладнання, заміною менш надійного обладнання або його вузлів та деталей більш надійним;
- г) модернізацією обладнання.

Висновки. Досліджено ймовірність безвідмовної роботи для технічних засобів проведення суднових операцій, що дозволило визначити ймовірність відмови на різних часових проміжках. Визначено ймовірність відмови кожного з технічних засобів протягом часу t . Визначення середнього напрацювання до першої відмови дозволить своєчасно замінити елемент технічної системи, тим самим забезпечивши її надійність. Досліджено процес функціонування технічних засобів в період відновлення. Виведено функцію ймовірності безвідмовної роботи в момент часу t з врахуванням відновлюваності, з використанням виведеного нами відносного коефіцієнту часу відновлення технічних засобів. Надано перелік заходів, що забезпечують потрібний рівень надійності технічних засобів проведення суднових операцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дичко А. О., Єремєєв І. С. Аналіз ризиків і менеджмент водних екосистем. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2018. № 4. С. 115–122.
2. Абракітов В. Е. Курс лекцій «Надійність технічних систем і техногенний ризик»; Харк.нац. ун-т ім. О. М. Бекетова. Х.: ХНУМГ, 2014. 66 с.
3. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Нормування показників надійності технічних засобів : навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2010. 129 с.

4. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. К. : Держстандарт України, 1994. 36 с. (Національний стандарт України).
5. Костановський В. В., Козачук О. Д. Метод ідентифікації параметрів універсальної моделі відмов, яка апроксимує узагальнену криву інтенсивності відмов електронної техніки. Наукоємні технології. 2018. Т. 40. № 4. С. 465-471.
6. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І. Теорія ймовірностей і математична статистика: Навч.-метод. Посібник: У 2-х ч. Ч.І. Теорія ймовірностей. К.: КНЕУ, 2000. 304 с.
7. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І., Савіна С.С. Теорія ймовірностей і математична статистика: Навч.-метод. Посібник: У 2-х ч. – Ч.ІІ. Математична статистика. – К.: КНЕУ, 2001. – 336 с.
8. Волошенко А.Б., Джалладова І.А. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. Метод. Посібник для самостійного вивчення дисципліни.: К.: КНЕУ, 2003. 256 с.
9. Канарчук В.С., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. Либідь, 2003. 424 с.
10. Барнік М.А., Афтаназів І.С., Сівак Ш.О. Технологічні методи забезпечення надійності деталей машин К., 2004. 148 с.

REFERENCES

1. Dychko, A.O., Yermieiev I.S. (2018), "Analysis of risks and management of water ecosystems", Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, vol. 4, no. 4, pp. 115-122.
2. Abrakotov, V. E. (2014), *Nadijnist' tekhnichnykh system i tekhnohennyj ryzyk* [Reliability of technical systems and man-made risk], KhNUMH, Khar'kiv, Ukraine.
3. Vasilevs'kyj, O. M. And Podzharenko, V. O. (2010), *Normuvannia pokaznykiv nadijnosti tekhnichnykh zasobiv* [Standardization of reliability indicators of technical means], Vinnytsia, Ukraine.
4. National Standard of Ukraine (1994), "DSTU 2860-94 "Reliability of equipment. Terms and definitions", Derzhstandart Ukrainy. p. 36
5. Kostanovs'kyj, V. V. and Kozachuk, O. D. (2018), "A method of identifying the parameters of the universal failure model, which approximates the generalized failure intensity curve of electronic equipment", *Naukoiemni tekhnolohii*, vol.4, pp. 465-471.
6. Zhluktenko, V.I. and Nakonechnyj, S.I. (2000), *Teoriia jmovirnostej i matematychna statystyka* [Probability Theory and Mathematical Statistics], Teoriia jmovirnostej P.1, KNEU, Kyiv, Ukraine.
7. Zhluktenko, V.I., Nakonechnyj, S.I. and Savina S.S. (2001), *Teoriia jmovirnostej i matematychna statystyka* [Probability Theory and Mathematical Statistics], matematychna statystyka P 2, Kyiv, Ukraine.
8. Voloshenko, A.B. and Dzhalladova, I.A. (2003), *Teoriia jmovirnostej ta matematychna statystyka* [Probability Theory and Mathematical Statistics], Kyiv, Ukraine.
9. Kanarchuk, V.S., Polians'kyj, S.K. and Dmitriiev M.M. (2003), *Nadijnist' mashyn*: [Machine reliability], Lybid, Kyiv, Ukraine.
10. Barnik, M.A., Aftanaziv, I.S. and Sivak, Sh.O. (2004), *Tekhnolohichni metody zabezpechenni nadijnosti detalej mashyn* [Technological methods of provision reliability of machine parts], Kyiv, Ukraine.

Melnyk O.

RESEARCH OF THE OPERATIONAL RELIABILITY OF TECHNICAL EQUIPMENT AS A FACTOR OF IMPROVING SAFETY IN THE CONDUCT OF SHIP OPERATIONS

The article considers the application of a system approach to the analysis of the safety of the operation of technical facilities during ship operations. When studying the safety of ship operations, three groups of indicators are distinguished: indicators of the quality of the technical system (readiness for operation), taking into account external factors (natural conditions, meteorological data), and the quality of operation, which depends on the training of technical personnel. To solve the problem of assessing the risk and safety of the operation of technical means during ship operations, several basic principles are proposed, based on which mathematical models of readiness for the operation of technical means of the ship operations system are proposed, taking into account their random and uncertain parameters. The readiness function, which is a comprehensive indicator of reliability, was obtained, as it depends on the fail-safe indicators and indicators of the technical system's recoverability. Auxiliary measures to ensure operational reliability are proposed, which will allow to reduce the level of risks, which will allow to prevent accidents during ship operations.

Keywords: *safety, ship operations, technical facilities, readiness, probability of failure-free operation, operational reliability.*

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20

Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М.

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВПОРСКУВАННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ДО СКЛАДУ ЯКИХ ВХОДИТЬ ПАЛИВО БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Розглянути питання управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження. Визначено, що під час використання паливних сумішей до складу яких входить біопаливо відбувається зміна експлуатаційних показників дизеля, насамперед максимального тиску згорання, температури випускних газів та емісії оксидів азоту з випускними газами. З метою попередження цього явища, а також з метою покращення екологічності роботи суднового дизеля та зниження механічних і теплових навантажень запропоновано виконувати переналаштування паливної апаратури високого тиску, яке полягає в зміні кутів випередження впорскування палива. Експерименти, що підтвердили це припущення були виконані на суднових дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel, експлуатація яких виконувалась на паливній суміші, до складу якої входило нафтове паливо RMA10 та біопаливо FAME 99.9, яке є сумішшю різних метилових ефірів жирних кислот. Експерименти виконувались для двох типів паливних сумішей: паливо RMA+10 % біопалива FAME 99.9 та паливо RMA+15 % біопалива FAME 99.9. Цей склад сумішей забезпечував максимальне зниження емісії оксидів азоту та діоксидів вуглецю з випускними газами та мінімальне підвищення питомої витрати палива. Експериментально доведена необхідність зменшення кута випередження впорскування палива в разі використання в суднових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження. При цьому встановлено, що зменшення кута випередження

впорскування палива зі значення -14° до -9° для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші забезпечує зниження максимального тиску згоряння зі значень 9,1...15,8 МПа до значень 8,7...15,5 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та зниження емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень 6,19...7,14 кг/(кВт·год) до значень 5,93...6,61 кг/(кВт·год) – тобто на 4,2... 7,4 %. Також встановлено, що збільшення кута випередження впорскування палива зі значення -14° до -20° для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші призводить до підвищення максимального тиску згоряння до значень 9,5...16,1 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень до значень 7,10...7,70 кг/(кВт·год) – тобто на 7,1... 7,7 %. Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи судових дизелів.

Ключові слова: експлуатаційні показники, екологічність роботи дизеля, кут випередження впорскування палива, механічна напруженість, паливна апаратура високого тиску, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, судовий дизель, теплова напруженість.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт під час забезпечення вантажів та пасажирів, споживає велику кількість палива. При цьому світові потреби у рідкому паливі постійно зростають, його природні запаси щорічно знижуються, обсяги видобутку регламентуються країнами-виробниками. Водночас посилюються вимоги Міжнародних конвенцій та класифікаційних товариств відносно екологічності морських суден під час їх знаходження в портах, прибережних акваторіях та спеціальних екологічних районах, а саме:

- встановлені спеціальні зони з обмеження використання палива вміст сірки в кому перевищує 0,1 % за масою (Sulfur Emission Control Areas – SECAs) [1];
- регламентовано концентрація оксидів азоту в випускних газах в залежності від частоти обертання дизеля та року побудови судна [2];
- посилено контроль за викидами оксидів вуглецю [3].

Україна, як Європейська держава, імплементувала всі основні міжнародні резолюції та конвенції країн ЄС, в тому числі такі, що спрямовані на захист довкілля та насамперед Міжнародну конвенцію про запобігання забрудненню з суден – МАРПОЛ73/78, а також вимоги Міжнародної морської організації (International Marine Organization – IMO) щодо розробці плану управління енергоефективністю судна [4].

Однім зі шляхів, який сприяє розв'язанню завдання зменшення негативного впливу на довкілля з боку енергетичних установок морських суден та підвищення енергоефективності суден є поступовий перехід на використання альтернативного палива. Інтенсивні дослідження можливості його застосування проводять у даний час в різних країнах. Основними видами альтернативного палива є:

- зріджені горючі гази;
- водень;
- спирти та їх суміші з нафтовим паливом;
- рослинні олії;
- штучне рідке та газове паливо (біопаливо та біогаз) [5, 6].

Дослідження альтернативних видів судових палив (у тому числі палив біологічного походження, або біопалива) та вивчення їх впливу на економічні та екологічні показники судових дизелів є актуальним завданням. Її розв'язання сприятиме покращенню експлуатаційних параметрів роботи дизелів морських суден в складі пропульсивного комплексу морських та річкових засобів транспорту та зменшенню їх негативного впливу на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На морських і річкових суднах як теплові двигуни використовуються паротурбінні, газотурбінні та дизельні установки. При цьому дизелі встановлюються на всіх суднах без винятку, незалежно від їх типу, класу та дедвейту [7, 8].

Ефективна потужність дизелів використовується для руху судна або забезпечення електричної енергії суднового обладнання, механізмів і систем. Її одержання неможливе без згоряння палива в циліндрі [9, 10]. Сучасні наукові проекти, спрямовані на використання сонячної енергії та енергії вітру, у морському транспорті можуть застосовуватись лише частково. Встановлення сонячних батарей на відкритих палубах потребує їх постійного демонтажу до та після виконання вантажних робіт. Застосування вітряних генераторів та жорстких вітрил збільшує аеродинамічний опір у випадку погіршенні гідрометеорологічних умов. Використання акумуляторних батарей на транспортних суднах потребує постійного відновлення їхньої ємності, що неможливо в умовах тривалих морських переходів [11, 12]. Таким чином, основним джерелом енергії для суднових енергетичних установок на найближчу перспективу залишиться рідке паливо, але водночас з цим на суднах морського та внутрішнього водного транспорту використовується паливо біологічного походження (біопаливо). Цей ти палива також відноситься до категорії рідких, має густину та в'язкість значення яких збігаються з аналогічними показниками рідкого палива нафтового походження, тому легко утворює з ними паливні суміші, які використовуються в суднових дизелях. Вміст біопалива в таких сумішах коливається в межах 5...30 % та, як правило, заснований на рекомендаціях виробників біопалива. При цьому оптимальний вміст біопалива в суміші (такий, що забезпечує найкращі екологічні показники роботи дизеля з одночасним підтриманням його ефективної потужності та мінімальним збільшення питомої витрати палива) знаходиться всередині вказаного діапазону, залежить від навантаження дизеля та визначається експериментально.

Формулювання цілей статті. Через різницю в структурному та фракційному складі нафтових палив та палив біологічного походження, суміші, що з них складаються, згоряють в циліндрі дизелів з іншою інтенсивністю тепловиділення в порівнянні з цим показником для нафтових палив. Це пов'язане з меншою температурою спалаху палив біологічного походження та більшою швидкістю їх згоряння. Це може призвести до критичного підвищення тиску наприкінці згоряння, а також (через збільшення температури під час згоряння) до підвищенню утворення теплових оксидів азоту та відповідному зростанню їх загальної кількості в складі випускних газів.

Розв'язання цього завдання можливе шляхом зміни кутів впорскування палива, за допомогою чого можливий зсув процесу згоряння в бік зниження максимальних значень з одночасним підтримання екологічних та енергетичних показників роботи дизеля. Для досягнення результатів необхідно проведення експериментів на основних експлуатаційних режимах роботи дизеля. В зв'язку з цим, ціллю статті була розробка рекомендацій щодо зміни фаз паливоподачі під час переведення роботи суднових дизелів на використання паливних сумішей, до складу яких входить біопаливо.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження, що забезпечили досягнення поставленої цілі, виконувались на спеціалізованому морському судні дедвейтом 12910 тонн. До складу допоміжної енергетичної установу судна входили три суднових середньообертових дизеля 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel з наступними основними характеристиками:

- діаметр циліндра – 0,20 м;
- хід поршня – 0,30 м;
- частота обертання – 720 хв⁻¹;
- номінальна потужність – 800 кВт;
- кількість циліндрів – 6.

Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 1.

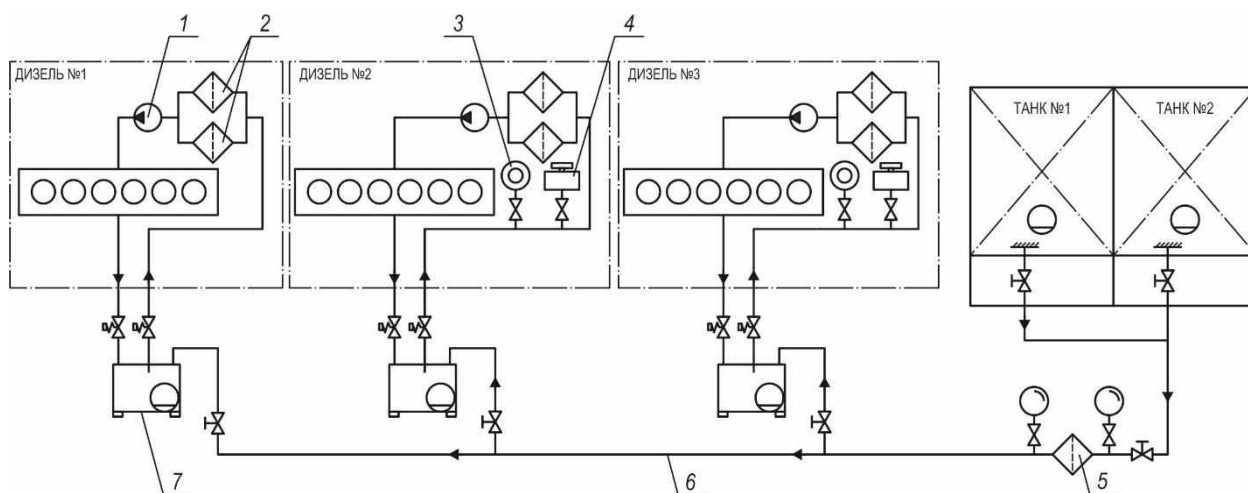


Рисунок 1 – Принципова схема паливної системи суднових дизелів
6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel:

- 1 – насос, що підкачує паливо; 2 – подвійний паливний фільтр тонкого очищення;
3 – витратомір палива нафтового походження; 4 – дозатор біопалива; 5 – паливний фільтр
грубого очищення 6 – магістраль поповнення кількості паливна в витратних цистернах;
7 – цистерна витратного паливна

Суднові дизелі обладнані системою електронного управління паливоподачею, в якій паливо потрапляє в загальний розподільний блок та за далі за високим тиском спрямовується до форсунок. Саме за допомогою електронного управління забезпечується зміна кутів впорскування палива в циліндри дизеля. Відповідно до принципової схеми, що надана на рис. 1., подача палива до загального розподільного блоку забезпечувалась насосом, що підкачує паливо 1. Якість очищення палива або паливної суміші підтримувалась в подвійному паливному фільтрі тонкого очищення 2. Кількість палива нафтового походження, що потрапляло до загальний розподільного блоку, контролювалось за допомогою витратоміру 3. Утворення суміші нафтового палива та біопалива забезпечувалось за допомогою дозатору 4. Кожний з дизелів був обладнаний окремою цистерною витратного паливна 7, необхідна кількість палива в якій забезпечувалась шляхом самопливу палива з загальних танків. Попереднє очищення палива забезпечувалось в фільтрі грубого очищення 5, якій було встановлено на загальній магістралі 6.

Під час проведення досліджень технічний стан дизелів відповідав один одному, це забезпечувалось однаковою кількістю годин яку дизелі знаходилися в експлуатації та збігом поточних результатів з визначення основних експлуатаційних характеристик моторного мастила, що забезпечувало режимі їх мащення [13, 14], тепловими зазорами в елементах випускної системі та станом колінчатого валу. Дослідження виконувались лише на сталих режимах роботи дизелів, при цьому у випадку проведення експериментів на двох дизелях, їх навантаження збігались з неузгодженістю не більш ніж $\pm 2,5\%$. З такою ж неузгодженістю підтримувались температура та тиск робочих речовин в системах циркуляційного мащення та внутрішнього охолодження прісною водою. У випадку збільшення навантаження на судову електростанцію, це навантаження рівномірно поділось між дизелями, на яких проводились дослідження. Це гарантувало збіг умов проведення експерименту для кожного з дизелів та надавало можливість порівняння результатів випробувань, що були отримані на різних дизелях [15, 16].

Експерименти виконувались з використанням палив, основні характеристики яких надані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики суднових палив під час проведення досліджень на дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Характеристика	FAME 99.9	DMA	RMA10
В'язкість при 40 °C, мм ² /с	4,5...5	5,8...6,1	6,5...6,7
Температура спалаху, °C	120	122	135
Вміст сірки, г/кг	0,01	0,08	0,35
Густина при 15 °C, м ³ /кг	900	896	920
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	37650	42160	41910

Експлуатація дизелів на паливі DMA (зі вмістом сірки 0,08 % за масою) виконувалась під час знаходження судна в SECAs. За умовою знаходження судна поза SECAs використовувалось паливо RMA10 (зі вмістом сірки 0,35 % за масою) [17, 18]. Як біодизельне паливо використовувалось паливо FAME 99.9, яке є сумішшю різних метилових ефірів жирних кислот. До основних переваг палива FAME 99.9 відносяться його схожі з дизельним паливом експлуатаційні характеристики (насамперед в'язкість, густина та температура спалаху), а також відсутність токсичності та здатність до біорозкладення. Це дозволяє використовувати біопаливо FAME 99.9 в суднових дизелях як складової паливної суміші, основною частиною якої (80...95 %) є дизельне паливо.

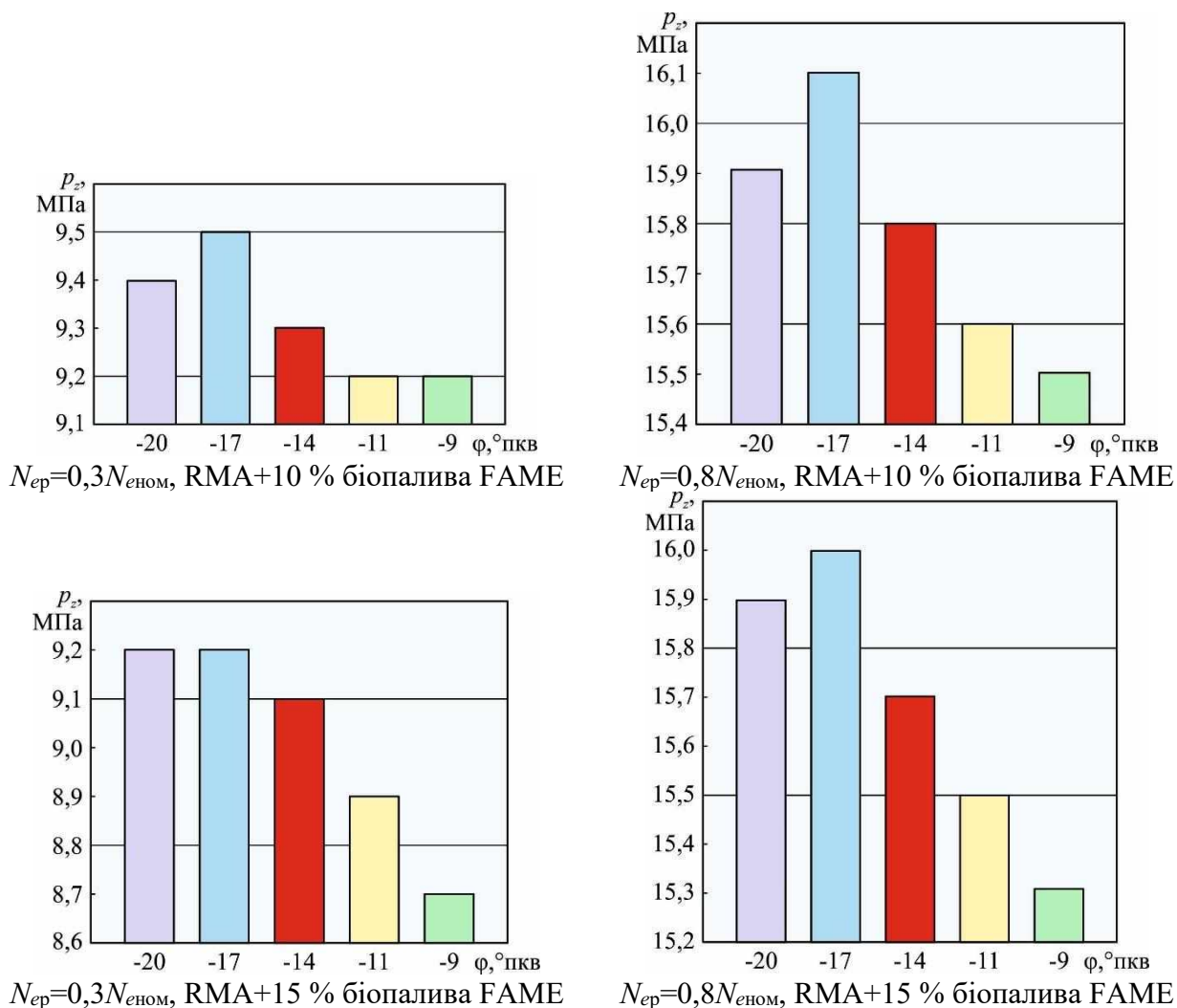
Паливні суміші, які утворювались за допомогою дозерного пристрою (позиція 4 на рис. 1), містили в своєму складі від 5 % до 20 % біодизельного палива (відповідно вміст в суміші палива нафтового походження коливався від 95 % до 80 %). Паливні суміші використовувались в двох дизелях, паливні системи яких додатково обладнувались витратоміром та дозатором. Паливна система ще одного дизеля не змінювалась та його експлуатація виконувалась виключно на паливі нафтового походження – DMA або RMA10. Дизелі експлуатувались на всьому діапазоні навантажень, але дослідження та фіксація результатів виконувались для навантажень 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Зміна навантаження в бік збільшення або зменшення виконувалась поступово з інтервалом, що не перевищував 5 %, це забезпечувало мінімальні температурні навантаження на елементі дизеля та мінімальні втрати енергії, що виникають під час зміни режимів роботи дизеля [19].

Попередніми дослідженнями був встановлено оптимальний вміст біопалива в його суміші з дизельним, при цьому досягалось максимальне зниження емісії оксидів азоту NO_x та діоксидів вуглецю CO₂ з випускними газами та мінімальне підвищення питомої витрати палива b_e [20, 21]. Як такий був визначений паливо RMA+10 % біопалива та паливо RMA+15 % біопалива. Саме цей склад паливної суміші був використано в паливних системах дизелів, на яких проводилися експерименти.

Подальшим кроком дослідження було визначення оптимального кута випередження впорскування $\phi_{\text{вв}}$, який забезпечує найбільш сприятливі з екологічної та енергетичної точки зору експлуатаційні показники роботи дизеля. Зміна кута випередження впорскування $\phi_{\text{вв}}$ здійснювалась в рекомендованому інструкцією з експлуатації дизеля 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel діапазоні $\phi_{\text{вв}} = -20...-10^\circ$ повороту колінчатого валу (пкв) [22, 23]. Попередній цикл досліджування (з визначення оптимального вмісту біопалива в паливної суміші) виконувався для кута випередження впорскування палива $\phi_{\text{вв}} = -14^\circ$ пкв. Під час проведення досліджень контролювалось значення максимального тиску згоряння p_z , температури випускних газів $t_{\text{вг}}$ та емісії оксидів азоту NO_x [24, 25]. Технологія досліджень погоджувалась з технічним відділом, що виконує менеджмент судом [26, 27]. Результати досліджень, що відображають зміну цих показників для рідного складу паливної суміші, різного навантаження та різних кутів випередження впорскування $\phi_{\text{вв}}$ наведені в таблицях 2-4. Для кращої візуалізації, результати, що надані в таблицях 2-3, відображені в вигляді діаграм (рис. 2-4).

Таблиця 2 – Максимальний тиск згоряння, МПа, в циліндрі дизеля для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Навантаження на дизель	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	9,4	9,5	9,3	9,2	9,2
$0,4N_{еном}$	10,1	10,2	10,0	9,9	9,8
$0,5N_{еном}$	11,1	11,2	11,0	10,8	10,7
$0,6N_{еном}$	12,4	12,7	12,5	12,4	12,2
$0,7N_{еном}$	14,0	14,2	14,0	13,8	13,6
$0,8N_{еном}$	15,9	16,1	15,8	15,6	15,5
	RMA+15 % біопалива FAME				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	9,2	9,2	9,1	8,9	8,7
$0,4N_{еном}$	10,2	10,0	9,9	9,7	9,6
$0,5N_{еном}$	11,3	11,0	10,8	10,6	10,4
$0,6N_{еном}$	12,4	12,3	12,3	12,1	13,8
$0,7N_{еном}$	14,3	14,0	13,8	13,6	13,4
$0,8N_{еном}$	15,9	16,0	15,7	15,5	15,3



Таблиця 3 – Температура випускних газів, °C, для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Навантаження на дизель	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	265	267	269	269	272
$0,4N_{еном}$	273	275	278	281	284
$0,5N_{еном}$	285	285	287	291	295
$0,6N_{еном}$	297	300	302	303	307
$0,7N_{еном}$	292	295	298	302	307
$0,8N_{еном}$	288	290	293	296	301
	RMA+15 % біопалива FAME				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	270	272	273	275	279
$0,4N_{еном}$	277	281	283	286	291
$0,5N_{еном}$	284	288	291	295	299
$0,6N_{еном}$	299	303	306	308	309
$0,7N_{еном}$	293	296	299	302	304
$0,8N_{еном}$	288	292	296	296	299

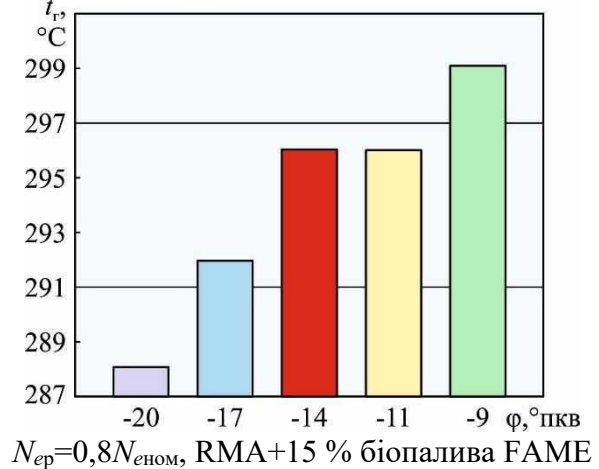
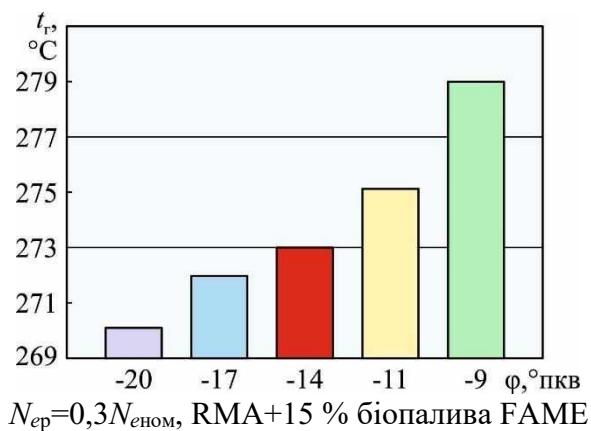
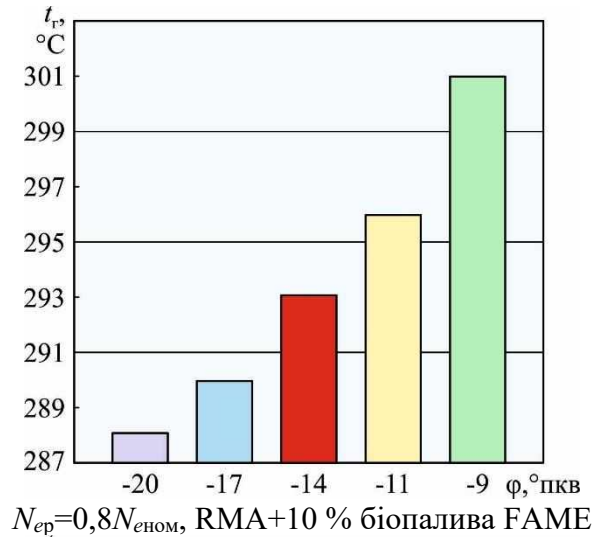
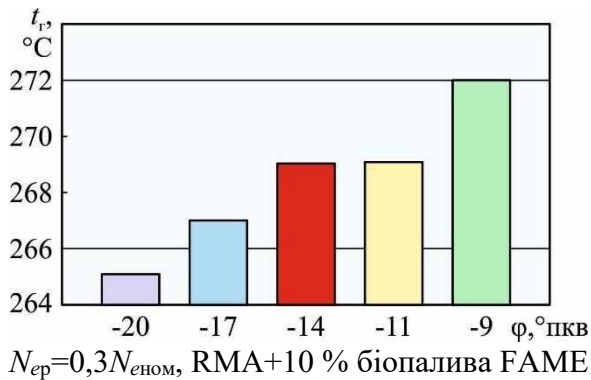


Рисунок 3 – Зміна температури випускних газів для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Таблиця 4 – Емісія оксидів азоту, г/(кВт·год), для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Режим роботи	Кут випередження впорскування, °ПКВ				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+10 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	7,12	6,80	6,62	6,48	6,18
$0,4N_{еном}$	7,28	6,96	6,68	6,58	6,27
$0,5N_{еном}$	7,41	7,12	6,78	6,63	6,34
$0,6N_{еном}$	7,52	7,28	6,82	6,72	6,46
$0,7N_{еном}$	7,61	7,33	6,88	6,77	6,56
$0,8N_{еном}$	7,67	7,40	7,14	6,80	6,61
	RMA+15 % біопалива FAME				
	-20	-17	-14	-11	-9
	RMA+15 % біопалива FAME				
$0,3N_{еном}$	6,63	6,60	6,19	6,15	5,93
$0,4N_{еном}$	6,81	6,71	6,29	6,26	6,08
$0,5N_{еном}$	6,94	6,79	6,41	6,32	6,16
$0,6N_{еном}$	7,09	6,88	6,52	6,39	6,25
$0,7N_{еном}$	7,19	6,93	6,54	6,48	6,33
$0,8N_{еном}$	7,27	7,00	6,65	6,52	6,41

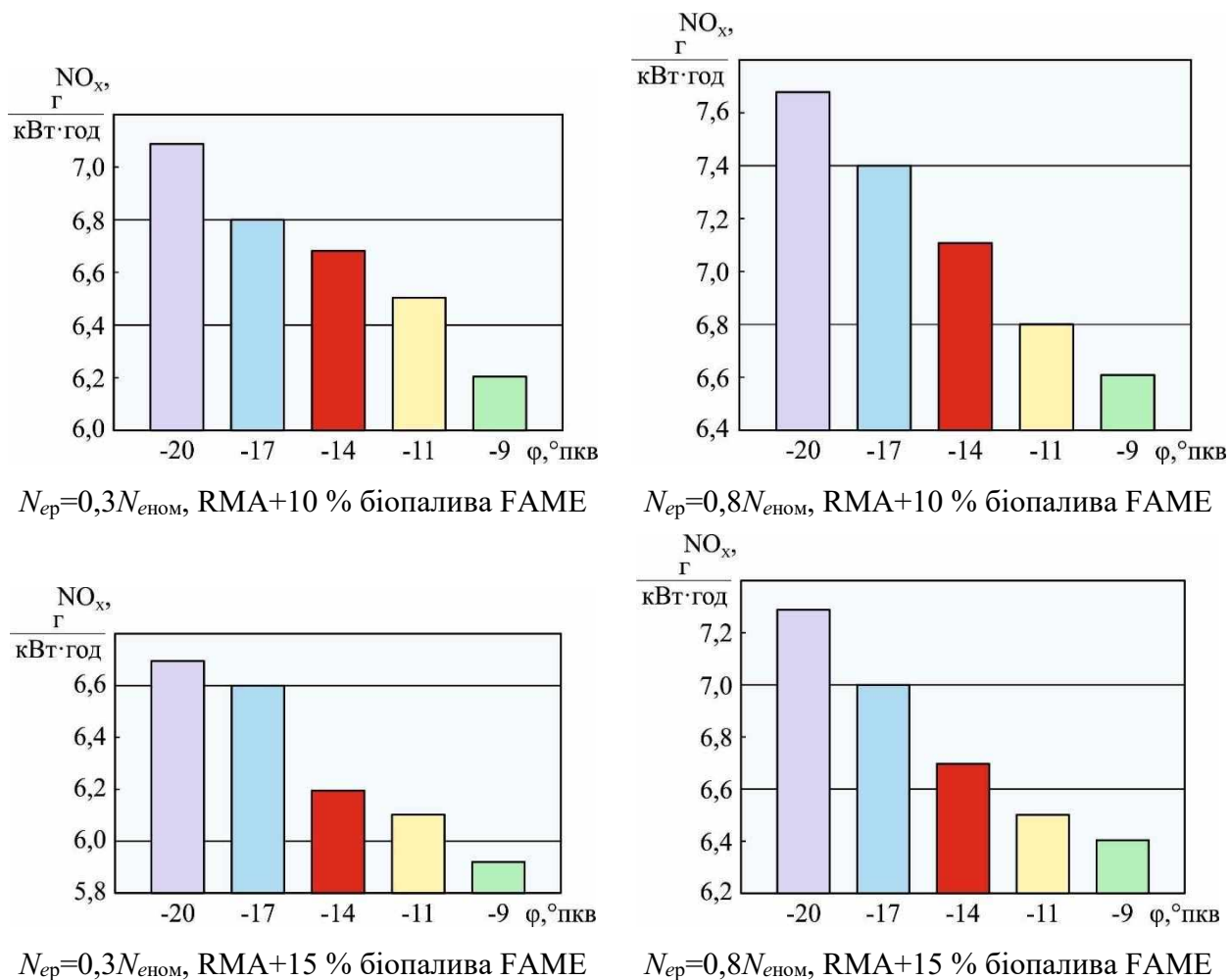


Рисунок 4 – Зміна емісії оксидів азоту для різних умов проведення експерименту на дизелі 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel

Висновки. Виконані на суднових дизелях 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel дослідження дозволили зробити наступні висновки та визначити напрямок подальших досліджень.

1. До одного з найпоширеніших варіантів впровадження альтернативних видів палива в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту є використання паливних сумішей, основною складовою яких є паливо нафтового походження (його вміст в суміші досягає 80...95 %), решту (зі вмістом 5... 20 %) складає паливо біологічного походження.

2. Одним з розповсюджених видів палива біологічного походження є біопаливо FAME 99.9, через його схожі з дизельним паливом експлуатаційні характеристики (насамперед в'язкість, густину та температуру спалаху), це паливо може використовуватися для забезпечення роботи суднових дизелів.

3. Через відмінний від дизельного палива структурний та фракційний склад біопалива, згоряння паливних сумішей, що з них утворюються, здійснюється з більшим виділенням теплоти та з підвищеною швидкістю згоряння. Це призводить до збільшення тиску та температури під час згоряння та може стати причиною надмірного підвищення динамічних навантажень та критичного підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами. Попередження та запобігання виникненню цих явищ можливо за рахунок зміни кутів випередження впорскування палива – як основного способу управління процесом згоряння, що виникає в циліндрі дизеля.

4. Експериментально доведена необхідність зменшення кута випередження впорскування палива в разі використання в суднових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження. При цьому встановлено, що зменшення кута випередження впорскування палива зі значення -14°пкв до -9°пкв для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші забезпечує зниження максимального тиску згоряння зі значень 9,1...15,8 МПа до значень 8,7...15,5 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та зниження емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень 6,19...7,14 кг/(кВт·год) до значень 5,93...6,61 кг/(кВт·год) – тобто на 4,2... 7,4 %. Також встановлено, що збільшення кута випередження впорскування палива зі значення -14°пкв до -20°пкв для різних експлуатаційних режимів та різного складу паливної суміші призводить до підвищення максимального тиску згоряння до значень 9,5...16,1 МПа (тобто на 1,9...4,4 %) та підвищення емісії оксидів азоту з випускними газами зі значень до значень 7,10...7,70 кг/(кВт·год) – тобто на 7,1... 7,7 %.

5. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження сприяє підвищенню екологічних показників роботи суднових дизелів та зменшенню їх динамічного навантаження. Визначення оптимальних кутів випередження палива досягається експериментальним шляхом та сприяє забезпеченню експлуатаційних показників роботи суднових дизелів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

4. Тимошук О.М, Мельник О.В. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
6. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
7. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
8. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
9. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
10. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
11. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
12. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Голіков В.А., Голіков В.В., Онищенко О.А. Використання технологій методології науки у дослідженнях морського та внутрішнього водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.
14. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – С. 84-103.
15. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
16. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
17. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31. – 2019. – Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
19. Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

20. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
21. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
22. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
23. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – April 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
24. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.
25. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
26. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 26. – С. 116-125.
27. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С. 109-118.

REFERENCES

1. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // Water transport. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // Water transport. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Parmenova D.G. Management techniques for self-assessment of shipboard safety management system efficiency // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Tymoshchuk O.M., Melnik O.V. Research of safety of bunking on maritime transport // Water transport. – 2020. – Vol. 1(29). – P. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
6. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.
7. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
8. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

9. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
10. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
11. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
12. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport*. – 2023. – Vol 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Golikov V.A., Golikov V.V., Onishchenko O.A. Use of scientific and methodological technologies in maritime and inland waterway transport // *Water transport*. – 2022. – Vol. 1(35). – P. 5-14. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.01.
14. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
15. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
16. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
17. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31. – 2019. – Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.
19. Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine medium-speed diesel engines due to optimization of lubrication circulation systems // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87 -96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
20. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
21. Sagin S.V. The rheology of motor oils in the starting and reversing modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – Vol. 3(48). – P. 67-71.
22. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
23. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – April 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship technical facilities*. – 2019. – Vol. 25. – P. 79-89.
25. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. – 2018. – № 24. – P. 72-80.
26. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
27. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // *Ship power plants*. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.

Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M.

DIRECTION OF THE INJECTION PROCESS DURING THE USE OF FUEL MIXTURES THAT INCLUDE FUEL OF BIOLOGICAL ORIGIN IN MARINE DIESEL ENGINES

Consider the issue of directing the injection process during the use of fuel mixtures that include fuel of biological origin in marine diesel engines. It was determined that during the use of fuel mixtures, which include biofuel, there is a change in the operating parameters of the diesel engine, primarily the maximum combustion pressure, the temperature of the exhaust gases, and the emission of nitrogen oxides with the exhaust gases. In order to prevent this phenomenon, as well as to improve the environmental friendliness of the ship's diesel engine and reduce mechanical and thermal loads, it is proposed to perform a reconfiguration of the high-pressure fuel equipment, which consists in changing the fuel injection advance angles. Experiments that confirmed this assumption were performed on marine diesel engines 6DK-20e Tier II Daihatsu Diesel, which were operated on a fuel mixture that included petroleum fuel RMA10 and biofuel FAME 99.9, which is a mixture of various methyl esters of fatty acids. Experiments were performed for two types of fuel mixtures: fuel RMA+10% biofuel FAME 99.9 and fuel RMA+15% biofuel FAME 99.9. This composition of the mixtures ensured the maximum reduction of the emission of nitrogen oxides and carbon dioxide with exhaust gases and the minimum increase in specific fuel consumption. The necessity of reducing the advance angle of fuel injection in the case of using fuel mixtures containing biological fuel in marine diesel engines has been experimentally proven. At the same time, it was found that reducing the fuel injection advance angle from -14° to -9° for different operating modes and different fuel mixture composition ensures a decrease in the maximum combustion pressure from values of 9.1–15.8 MPa to values of 8.7–15.5 MPa (by 1.9–4.4 %) and a decrease in the emission of nitrogen oxides with exhaust gases from the values of 6.19–7.14 kg/(kW·h) to the values of 5.93–6.61 kg/(kW·h) – by 4.2–7.4 %. It was also established that increasing the fuel injection advance angle from -14° to -20° for different operating modes and different fuel mixture composition leads to an increase in the maximum combustion pressure to values of 9.5–16.1 MPa (by 1.9–4.4 %) and an increase in the emission of nitrogen oxides with exhaust gases from values to values of 7.10–7.70 kg/(kW·h) – by 7.1–7.7 %. Determining the optimal fuel advance angles is achieved experimentally and contributes to ensuring the operational performance of marine diesel engines.

Key words: *environmental friendliness of diesel engine, fuel injection advance angle, fuel of biological origin, fuel of petroleum origin, high-pressure fuel equipment, marine diesel, mechanical stress, performance indicators, thermal stress.*

Sagin A.C., Sagin C.B.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ФАЗ ПОДАЧІ ПАЛИВА В ЦИЛІНДР СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Розглянути питання щодо експериментального визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр дизеля під час зміни одного сорту палива на інший. Визначено, що відповідно до вимог Додатку VI Міжнародної конвенції MARPOL експлуатація суднових дизелів в деяких районах Світового океану можлива лише за умовою використання палива, вміст сірки в яких не перевищує 0,1 %. Важливо ретельно аналізувати паливо для дизельного двигуна, адже характеристики палива суттєво впливають на його роботу та екологічні показники. Під час використання такого палива швидкість згоряння та тиск у камері згоряння дизеля значно вище. Це може призвести до підвищеного зносу деталей двигуна та збільшення викидів оксидів азоту. Як метод, що сприяє попередженню або зменшенню негативної дії цих явищ запропоновано переналаштування паливної апаратури високого тиску, а саме зміна кутів впорскування палива. Дослідження виконувались на судні класу General Cargo з головним двигуном 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel & Turbo. Ефективність методу оцінювалась за тиском згоряння, ступенем його підвищення, температурою та концентрацією оксидів азоту в випускних газах. Експерименти показали, що метод знижує всі ці показники, що свідчить про його позитивний вплив на екологічну стійкість роботи дизеля. Метод, заснований на зміні кутів впорскування палива, дозволяє покращити екологічні та енергетичні показники роботи суднових дизелів та може бути впроваджений під час експлуатації двигунів з електронною системою управління подачею палива.

Ключові слова: *впорскування палива, головна енергетична установка, динамічні навантаження, діагностування дизеля, екологічні показники, кут впорскування палива, морський транспорт, паливна апаратура, паливо для суднових дизелів, судновий дизель, теплові навантаження.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасні судна морського та внутрішнього флоту є життєво важливою ланкою в ланцюжку постачання, що з'єднує країни на різних континентах. Різноманітні вантажі, від готової продукції та сировини до зерна, нафти та газу, перевозяться морськими судами різної вантажопідйомності та призначення. [1, 2].

Від сучасних двигунів потребується не лише забезпечення необхідної потужності та надійності, а ще також відповідність сучасним екологічним нормам. Концентрація SO_x та NO_x у випускних газах – це два ключові показники екологічності, які регулюються MARPOL. Їх граничні значення залежать від року випуску та частоти обертання дизеля (Tier I, II або III) для NO_x та від вмісту сірки в паливі для SO_x [3-5]. Відповідно до цих вимог, вміст сірки в паливі що використовують судна не повинен перебільшувати 0,5 % та 0,1 % під час експлуатації судна в спеціальних зонах контролю [6-8].

Перехід дизельних двигунів на паливо з низьким вмістом сірки несе за собою ряд проблем, пов'язаних зі зміною його хімічного складу. Зниження концентрації сірки веде до зменшення густини, в'язкості та температури самозаймання. Збільшення швидкості згоряння та тиску під час згоряння може мати як позитивні, так і негативні наслідки. Тому важливо правильно налаштувати двигун для роботи з паливом з низьким вмістом сірки, щоб максимізувати позитивні ефекти та мінімізувати негативні. Це може включати: зміну параметрів впорскування палива, зміну тиску наддуву. З іншого боку збільшення швидкості

згоряння може призвести до збільшення навантаження на деталі двигуна та скорочення його ресурсу.

Двотактні дизелі більш чутливі до проблем, пов'язаних з раннім самозайманням та високою температурою при роботі з паливом з низьким вмістом сірки. Це пов'язано з збільшеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму та підвищеними ударними навантаженнями на підшипники. Результати моделювання для дизелів MAN-Diesel&Turbo з однаковим діаметром циліндра D , але різним ходом поршня S , наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання

Дизель та його характеристики	Характеристики палива		Температура наприкінці згоряння, К
	вміст сірки, %	теплотворна здатність, кДж/кг	
K80ME $D=0,8$ м, $S=2,3$ м	0,48...0,50	41580	1869
	0,4...0,45	41864	1878
	0,05...0,09	42180	1896
L80ME $D=0,8$ м, $S=2,592$ м	0,48...0,50	41596	1825
	0,4...0,45	41899	1839
	0,05...0,09	42241	1858
S80ME $D=0,8$ м, $S=3,056$ м	0,48...0,50	41695	1815
	0,4...0,45	41888	1836
	0,05...0,09	42240	1851
G80ME $D=0,8$ м, $S=3,72$ м	0,48...0,50	41595	1758
	0,4...0,45	41918	1762
	0,05...0,09	42260	1788

Зміна палива на сорти, що містять низку кількість сірки з одного боку забезпечує екологічні вимоги MARPOL, з іншого – через підвищення температури згоряння може призвести до акумуляції зайвої теплоти в деталях циліндрової групи та газовипускної магістралі дизеля, що сприяє підвищенню температурної напруженості та зростанню концентрації оксидів азоту в випускних газах [15-17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують методи боротьби з вказаними негативними наслідками, що виникають під час переведення дизелів на паливо з низьким вмістом сірки. До них відносяться додаткове зволоження стиснутого повітря, додаткове впорскування води в циліндр дизеля, використання системи перепуску та рециркуляції випускних газів, а також їх безпосередньо очищення. Для досягнення оптимальних результатів важливо обрати методи, що відповідають конкретному двигуну та умовам його роботи. Боротьба з негативними наслідками переходу на екологічне паливо, хоча й має рішення у вигляді стиснутого повітря, додаткового впорскування води та технологій зниження викидів NO_x , зумовлює зниження потужності двигуна, швидкості судна та потребує додаткових витрат [18-20]. Крім того, впровадження цих методів можливо лише на етапі будівництва дизелів, тому не може бути рекомендовано для судових дизелів, що знаходяться в експлуатації. Найбільш сприятливим методом керування процесами згоряння під час використання палива з різними експлуатаційними характеристиками та структурним складом є зміна кутів впорскування палива. Також визначимо, що цей метод найбільш доцільний до використання в дизелях з електронним управлінням подачею палива.

Формулювання цілей статті. В зв'язку з викладеним, метою дослідження було розробка методу керування фазами впорскування під час тимчасового використання в судових дизелів паливо з низьким вмістом сірки.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є процес експлуатації судових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %. Дослідження проводилося на спеціалізованому морському судні класу General Cargo. Як головний двигун на

судні був встановлений судновий дизель 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo. Як основні показники дизеля визначимо:

- діаметр циліндра – 0,50 м;
- хід поршня – 2,214 м;
- частота обертання вала – 117 об/хв;
- кількість циліндрів – 7;
- номінальна потужність – 12460 кВт.

Параметри роботи дизеля та характеристики випускних газів контролювалися за допомогою суднової системи діагностики, яка дозволяла виконувати їх визначення з відхиленням не більш $\pm 0,5\%$.

Під час досліджень дизель експлуатувався на трьох видах палива: в разі знаходження в зонах спеціального екологічного контролю SECAs – на дистильованому паливі DMB; в разі знаходження поза зон SECAs – на важких паливах RMK380 або RMG500. Основні характеристики палив наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики суднових палив

Характеристика	RMG500	RMK380	DMB
Вміст вуглецю, %	83,0	83,6	83,6
Вміст водню, %	10,3	10,5	11,4
Вміст сірки, %	0,46	0,48	0,06
Густина за 15 °С, кг/м ³	991	996	892
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	500	380	6
Температура спалаху, °С	88	92	64
Температура самозаймання, °С	216	231	111
Теплотворна здатність, кДж/кг	41056	40953	42444

Перехід суднових дизелів на паливо з меншим вмістом сірки призводить до збільшення навантажень і погіршення екологічних показників. Зміну кута випередження впорскування було обрано як метод регулювання фаз подачі палива. [21, 22]. Оптимальні значення кута випередження впорскування визначаються заводом-виробником під час стендових випробувань для номінального режиму роботи та палива, характеристики якого найбільш узгоджуються з сортами палива, на яких в майбутньому працюватиме дизель. Під час експлуатації дизелів судновий екіпаж враховує рекомендації заводу-виробника щодо найбільш оптимального діапазону кутів впорскування палива та в разі необхідності виконує переналаштування паливної апаратури з урахуванням саме цих значень. Відповідно з цим, технологія досліджень передбачала переналаштування системи подачі палива під час знаходження судна в SECA шляхом зміни кутів випередження для окремих циліндрів.

Переналаштування системи подачі палива дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo виконувалось в такій спосіб. Відповідно до рекомендацій заводу-виробнику, подачу палива в циліндр дизеля необхідно виконувати в діапазоні $-1...+5^{\circ}$ кутів повороту колінчатого валу (пкв). Для циліндру №4 значення куту впорскування палива (для якого відбувалась експлуатація дизеля під час використання палива RMG500) залишилося незмінним і становило $+2^{\circ}$ пакв.

Для циліндрів №№ 1, 2, 3, 5, 6, 7 встановлювались нові кути випередження подачі палива: $+5, +4, +3, +3, +4, +5^{\circ}$ пакв відповідно. Встановлення однакових кутів впорскування палива в двох циліндрах (в першому та сьомому, другому та шостому, третьому та п'ятому) застосування даного методу дало змогу розширити масив даних, покращити точність вимірювань та вносити корективи у разі їх відхилення.

Під час дослідження для кожного з циліндрів контролювались максимальний тиск горіння p_z , тиск в кінці стиску p_c та температура випускних газів t_f . Для кожного з наведених параметрів розраховувалося середнє значення. Наприкінці кожної серії експериментів всі циліндри дизелі

переводились на однаковий кут впорскування, після чого виконувалось вимірювання кількості оксидів азоту в випускних газах дизеля. Вимірювання цього показнику виконувалось послідовно для всього діапазону кутів впорскування палива, тобто +5, +4, +3, +2° пкв. Результати експериментів наведені в таблиці 3 та подані в вигляді номограм – рис. 2.

Таблиця 3 – Результати досліджень

Показник	Номер циліндру						
	1	2	3	4	5	6	7
Кут впорскування палива, θ , °пкв	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Тиск в циліндрі наприкінці процесу згоряння, p_z , МПа	14,7	14,65	14,55	14,35	14,45	14,58	14,76
Тиск в циліндрі наприкінці процесу стиснення, p_c , МПа	11,62	11,65	11,52	11,53	11,48	11,6	11,58
Температура випускних газів, t_r , °C	397	385	373	367	376	388	403
Концентрація оксидів азоту в випускних газах, NO_x , г/(кВт·год)	12,35	12,52	12,83	13,38	13,07	12,58	12,22
Ступінь підвищення тиску під час згоряння палива, λ	1,271	1,266	1,258	1,240	1,249	1,260	1,276

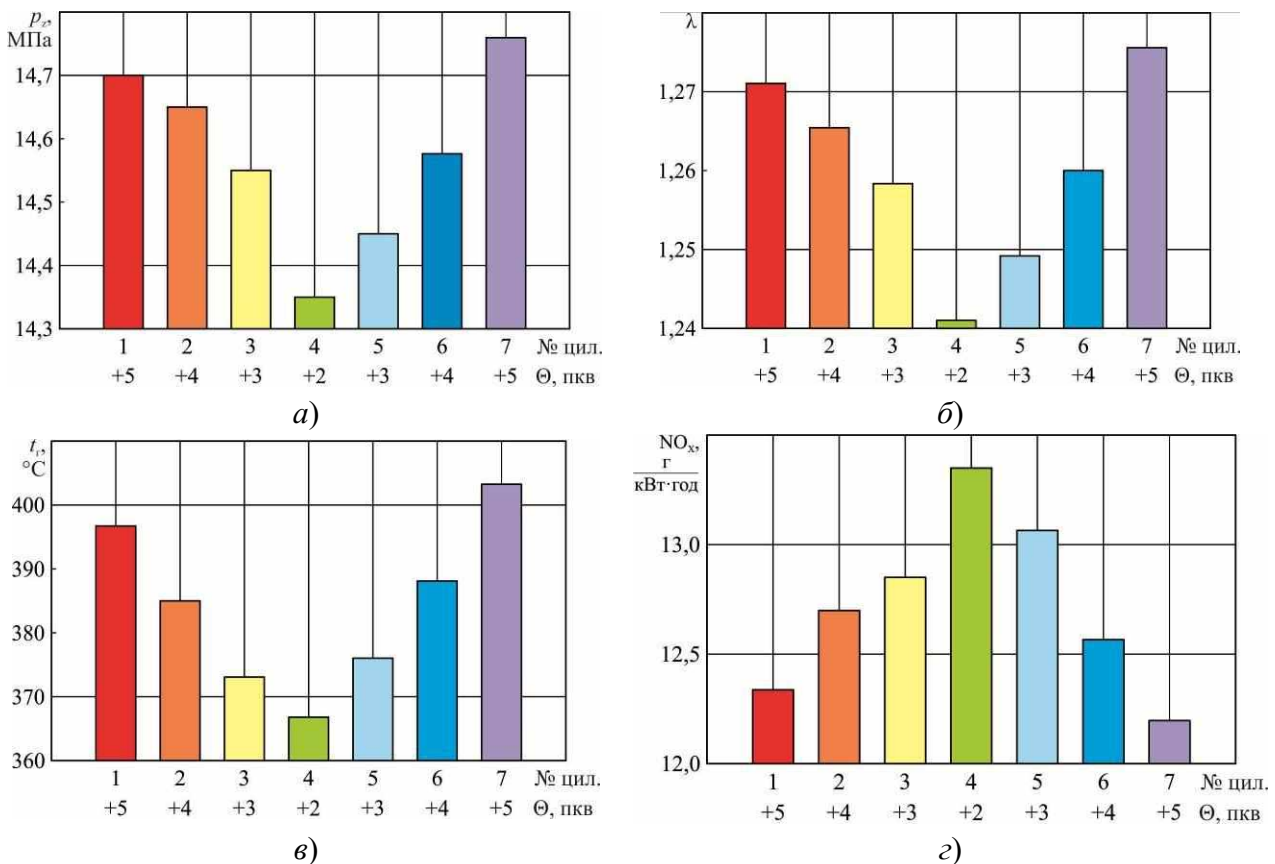


Рисунок 2 – Зміна показників роботи суднового двигуна

7S50ME-B9.3-ТII MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ :

а – максимальний тиск під час згоряння; б – температура випускних газів; в – ступінь підвищення тиску під час згоряння; г – концентрація оксидів азоту в випускних газах

Відносна зміна контрольованих показників роботи дизеля, яка може характеризувати екологічну – ΔNO_x , теплову – Δt_r та динамічну – $\Delta \lambda$ стійкість, розраховувалась за виразами:

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{Tier} - NO_x^i}{NO_x^{Tier}} \cdot 100\%; \quad \Delta t_r = \frac{t_r^{max} - t_r^i}{t_r^{max}} \cdot 100\%; \quad \Delta \lambda = \frac{\lambda^{max} - \lambda^i}{\lambda^{max}} \cdot 100\%;$$

де NO_x^{Tier} – максимальне значення викидів оксидів азоту відповідно до Додатку VI MARPOL;

t_r^{max} , λ^{max} – максимальні значення температури випускних газів та ступеня тиску;

NO_x^i , t_r^i , λ^i – відповідно, значення концентрації оксидів азоту в випускних газах, температури випускних газів та ступеня підвищення тиску, що були отримані під час проведення експерименту [27, 28].

Результати, що отримані під час розрахунку, наведені в таблиці 4 та подані на рис. 3.

Таблиця 4 – Показання запасу стійкості дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo

Показник	Кут повороту колінчатого валу						
	+5	+4	+3	+2	+3	+4	+5
Екологічна стійкість, %	14,24	13,06	10,90	7,08	9,241	12,64	15,15
Температурна стійкість, %	1,49	4,47	7,44	8,93	6,70	3,72	0
Динамічна стійкість, %	0,41	0,75	1,42	2,78	2,10	1,22	0

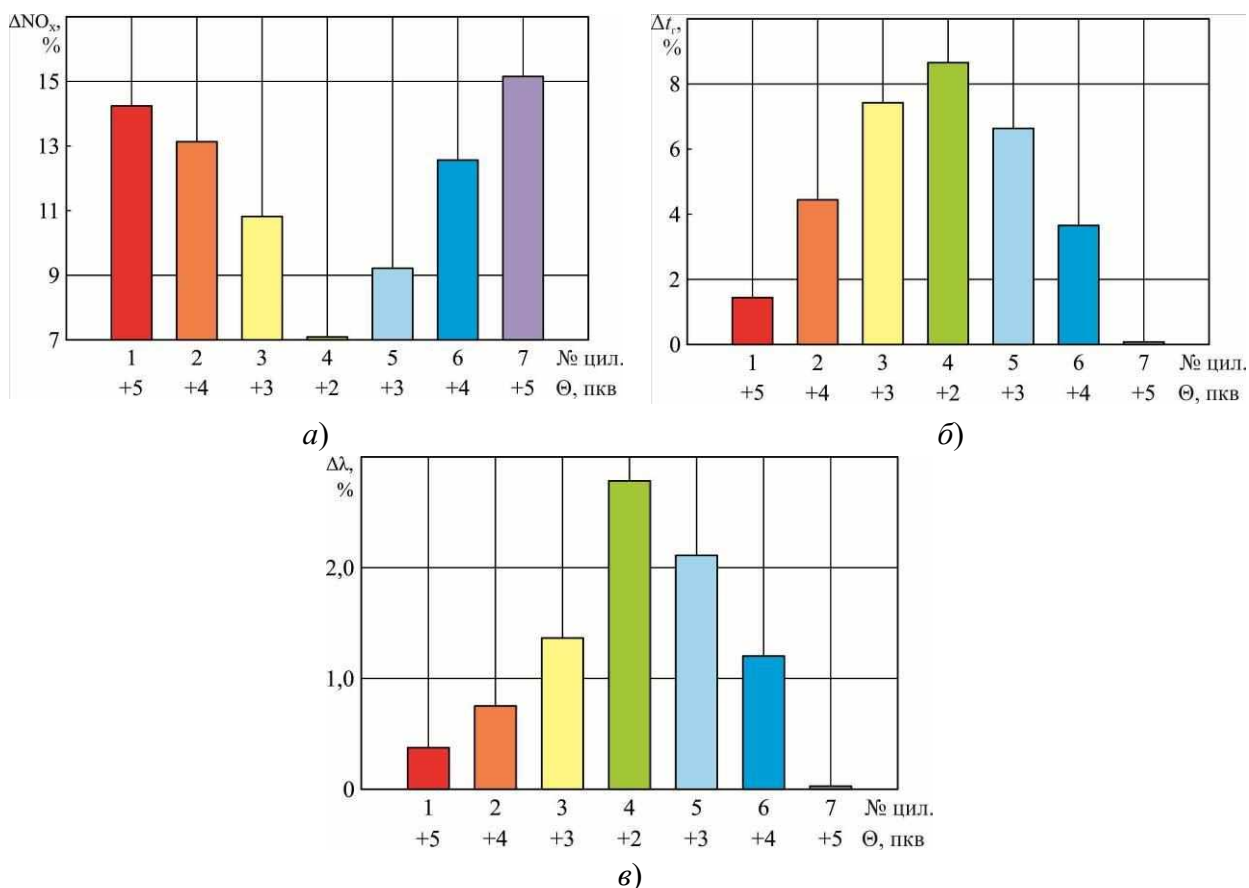


Рисунок 3 – Екологічна (а), теплова (б), динамічна (в) стійкість роботи суднового дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo за різних кутів впорскування палива θ

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки [29, 30].

Під час проведення експериментів все відбувалось згідно нормам та рекомендованим показникам дизеля 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo.

Висновки. На підставі виконаних досліджень визначимо наступне.

1. Переведення роботи дизелів на використання палива з низьким вмістом сірки, якій є обов'язковим під час експлуатації дизелів в екологічних зонах SECAs, може призвести до

інтенсифікації згорання, збільшення теплових та динамічних навантажень на дизель та погіршення екологічних показників його роботи.

2. Як метод, що попереджує збільшення теплової та динамічної напруженості дизеля в разі його тимчасового переведення на палива з низьким вмістом сірки, може використовуватися переналаштування паливної апаратури високого тиску дизеля, яке полягає в зміні кутів впорскування палива.

3. Експериментальними дослідженнями, що були проведені на судновому дизелі 7S50ME-B9.3-ТІІ MAN-Diesel&Turbo під час його переведення з важкого палива RMG500 зі вмістом сірки 0,46 % на дистильатне паливо DMB зі вмістом сірки 0,06 %, встановлено наступне:

збільшення кута випередження впорскування від +2 до +5°пкв призводить до зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах – зі значень 13,38 г/(кВт·год) до значень 12,22 г/(кВт·год), що забезпечує 2,1-кратне підвищення екологічної стійкості роботи дизеля;

одночасно з цим підвищується тепла та динамічна напруженість роботи дизеля, що вимагає додаткового контролю та регулювання.

4. Запропонований метод найбільш доцільно використовувати в двотактних та чотиритактних дизелях з електронною системою управління впорскуванням палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Тимошук О.М., Мельник О.В. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
6. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
7. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
8. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
9. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: науч.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – С. 84-103.
10. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
11. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих

- жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
12. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
13. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.
14. Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
15. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
16. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
17. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
18. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
19. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.
20. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
21. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol.10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
25. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotyski Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
26. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.

27. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienna. –2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
28. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
29. Голюков В.А., Нікольський В.В., Левінський М.В., Нікольський М.В., Слободянюк М.В. Модернізація системи віддаленого управління та контролю аварійного дизель-генератора навчального машино-котельного відділення // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2022. – № 44. С. 64-70. 10.31653/smf44.2022. 64-70.
30. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pířtěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.

REFERENCES

1. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
2. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
3. Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Parmenova D.G. Management techniques for self-assessment of shipboard safety management system efficiency // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – C. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.
4. Timoshchuk O.M., Melnik O.V. Research of safety of bunking on maritime transport // *Water transport*. – 2020. – Vol. 1(29). – P. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.
5. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. –Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
6. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // *Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
7. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
8. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. – 2018. –№ 24. – P.72-80.
9. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
10. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
11. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // *Automation of ship technical facilities*. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
12. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
13. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship technical facilities*. – 2019. – Vol. 25. – P. 79-89.
14. Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine medium-speed diesel engines due to optimization of lubrication circulation systems // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87 -96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

15. Bohomia V., Bazhak O. // Water transport – 2022. – Vol. 1(35). – P. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
16. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – Vol. 4(57). – P. 109-120.
17. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142.
18. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – Vol. 1(58). – P. 89-100.
19. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // Ship power plants. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
20. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
21. Sagin S.V., Zablotsky Yu. V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
22. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
23. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // Ship power plants. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
25. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
26. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
27. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna. – 2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
28. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
29. Golikov V., Nikolskyi V., Levinskyi M., Nikolskyi M., Slobodianiuk M. Emergency diesel generator remote control system upgrade in training engine room // Ship power plants. – 2022. – № 44. C. 64-70. 10.31653/smf44.2022. 64-70.
30. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – P. 120221. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.

Sagin A.S., Sagin S.V.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF OPTIMAL PHASES OF FUEL SUPPLY TO THE CYLINDER OF MARINE DIESEL ENGINES

Consider the issue of experimental determination of the optimal phases of fuel supply to the diesel cylinder during the change of one type of fuel to another. It was determined that in accordance with the requirements of Annex VI of the MARPOL International Convention, the operation of marine diesel engines in some areas of the world ocean is possible only under the condition of using fuel with a sulfur content of no more than 0.1 %. Similar types of fuel are characterized by a lower auto-ignition temperature and higher calorific value. During combustion, this leads to an increase in the rate of fuel combustion and the degree of pressure increase during combustion, precisely because of this, the dynamic loads on the parts of the cylinder-piston group and diesel engine bearings increase. Also, this (due to the increase in temperature at the end of combustion) creates conditions for an increase in the concentration of nitrogen oxides in diesel exhaust gases. Reconfiguration of the high-pressure fuel equipment, namely changing the fuel injection angles, is proposed as a method that contributes to the prevention or reduction of the negative effects of these phenomena. The research was carried out on a General Cargo class vessel with a 7S50ME-B9.3-TII MAN-Diesel & Turbo main engine. Combustion pressure, the degree of pressure increase during combustion, the temperature of exhaust gases, and the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases were chosen as the indicators for evaluating the use and implementation of the proposed method. It has been experimentally proven that this results in an increase in the environmental sustainability of diesel operation by 7.08-15.15 %, an increase in thermal stability – up to 8.93 %, and an increase in dynamic stability – up to 2.72 %. This is due to the shift of the self-ignition and combustion process towards expansion and the corresponding decrease in pressure and temperature at the end of combustion. The most favorable use of this method is on modern diesel engines that have an electronic fuel injection control system, so they do not require mechanical reconfiguration of fuel pumps. Taking this into account, the method based on the change of fuel injection angles is defined in such a way as to ensure the maintenance of environmental and energy indicators of marine diesel engines during their transfer from one type of fuel to another.

Key words: diesel diagnostics, dynamic loads, environmental indicators, fuel equipment, fuel for marine diesels, fuel injection angle, fuel injection, main power plant, marine diesel, marine transport, thermal loads.

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22

Sagin C.C., Sagin C.B.

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИТУАЦІЯХ НАДМІРНОГО ЗБЛИЖЕННЯ СУДЕН

Розглянуті методи контролю та управління рухом судна під час маневрування з метою забезпечення безпечного розходження, за умовою взаємодії навігаційного офіцера зі штучним інтелектом. Зазначено що, основною причиною аварій на морі є людський фактор, при цьому в окремих випадках навігаційний офіцер не може вчасно розрахувати необхідний маневр безпечного розходження суден. Для вирішення питання забезпечення безпеки судноплавства, була розглянута можливість застосування штучного інтелекту в ситуації надмірного зближення суден, згідно з відповідними нормами міжнародних правил запобігання зіткненню суден у морі, в яких вставлена чітка відповідальність дій які потрібно виконати навігаційному

офіцеру під час виникнення різноманітних ситуацій небезпечного зближення. Визначено, що навігаційний офіцер має змогу вносити різні дані в систему штучного інтелекту, такі як поточне положення судна, швидкість, курс, пеленг, погодні умови та будь-яку іншу відповідну інформацію, для того щоб система штучного інтелекту обробляла ці дані за допомогою алгоритму та моделі для оцінки поточної ситуації та прогнозувала виникнення потенційних майбутніх сценаріїв. Штучний інтелект включає аналіз ризиків зіткнення, оцінку впливу погодних умов та умов моря, а також враховує можливості маневрування судна. На основі власного аналізу система штучного інтелекту надає навігаційному офіцеру рекомендовані маневри розходження. Ці рекомендації враховують такі фактори, як найбезпечніший і найефективніший маршрут, щоб уникнути потенційних небезпек або оптимізувати поточний маршрут. Визначено, що протягом усього цього процесу штучний інтелект служить інструментом, який допомагає навігаційному офіцеру приймати обґрунтовані рішення щодо маневру розходження та аналізувати величезну кількість даних за короткий час. Через отримані результати та рекомендації від штучного інтелекту, навігаційний офіцер, беручи до уваги власний досвід, знання та особливості конкретних обставин, приймає остаточне рішення щодо маневру розходження. При цьому здійснюється врахування будь-яких інших важливих факторів, що могли залишитися неврахованими штучним інтелектом.

Ключові слова: безпека судноплавства, маневр розходження, маневрування, маршрут судна, метод управління, морський транспорт, навігаційна інформація, попередження зіткнення суден, прийняття рішення, рух судна, управління рухом судна, штучний інтелект.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Забезпечення та реалізація безпечного руху судна є найбільш актуальною проблемою, яка виникає під час надмірного зближення суден морського транспорту [1, 2]. Однією з її важливих складових є своєчасний аналіз ситуації та вибір маневру для безпечного розходження суден в ситуаціях небезпечного зближення. Основним методом, який регламентуються в Міжнародних правилах запобігання зіткнення суден у морі (МППЗС-72), є використання системи бінарної координатії під час виникнення ситуації надмірного зближення суден [3, 4]. Через щорічне збільшення судноплавства в усьому світі, виникає велика кількість різноманітних ситуацій небезпечного зближення суден під час їх розходження, що впливає на труднощі у виборі коректних дій, що приймаються для забезпечення безпечного розходження [5, 6].

Неодноразово визначалось, що основною причиною аварій на морі є людський фактор, при цьому в окремих випадках навігаційний офіцер не може вчасно розрахувати необхідний маневр безпечного розходження суден [7, 8]. Останнім часом велика увага приділяється створенню автоматичної системи вибору маневру розходження. Проте дослідження щодо перспективних автоматичних суднових систем для запобігання зіткненням та їх теоретичне обґрунтування з урахуванням факторів до повної автономної навігації все ще знаходяться в стадії тестування, а питання безпеки судноплавства та запобігання зіткненням морських транспортних суден все ще залишаються невирішеними, тому є актуальними [9, 10].

Питання впровадження штучного інтелекту в життя людини почали цікавити людство ще в середині минулого століття. Однак до початку 21 століття для більшості людей це здавалося фантазією, яку неможливо втілити в життя. Зараз такі компанії, як IBM Watson, Google, Microsoft, Apple, інвестують мільярди доларів у вдосконалення та впровадження своїх продуктів для масового використання. Використання та взаємодія людей зі штучним інтелектом у питаннях навігації може бути основною причиною підвищення безпеки та ефективності у судноплавстві. Розв'язання навігаційних проблем часто стикаються з невизначеністю інформації, складністю та вимогами часу негайно приймати рішення. Для цього і було запропоновано втручання штучного інтелекту, щоб мінімізувати витрати часу на розрахунки та сфокусувати на завчасному виборі безпечного маневру [11]. У рекомендаціях штучного інтелекту можуть враховуватися такі фактори, як найбезпечніший і найефективніший маршрут, щоб уникнути потенційних небезпек або оптимізувати роботу судна. Протягом усього цього

процесу штучний інтелект служить інструментом, який допомагає навігаційному офіцеру приймати обґрунтовані рішення щодо маневру розходження. У даній роботі розглядається проблема управління діями суден для реалізації рішення про розходження за допомогою взаємодії штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню питання безпеки судноплавства та попередження зіткнення суден морського транспорту присвячено ряд досліджень [12-14]. Одним із способів попередження зіткнень суден є метод складання аналітичного алгоритму розходження для існуючої ситуації [15]. Однак різноманітність ситуацій надмірного зближення суден вимагає детального розгляду ситуацій відповідно до регламенту МППЗС-72. До методів попередження зіткнення суден у морі відноситься зміщення судна на лінію паралельну шляху їх руху [16], однак цей метод є ефективним лише в умовах помірного трафіку суден.

Суттєвий внесок в вирішення питання забезпечення безпечного розходження суден надає метод використання формалізації МППЗС-72 у вигляді аналітичних виразів з метою визначення допустимих параметрів руху суден [17], згідно з якими границя безпечного руху суден буде відповідати гранично допустимій дистанції, яка забезпечить їх безпечне розходження.

Незважаючи на систематичне розглядання та аналізування цього питання, випадків зіткнення суден з кожним роком не лише не зменшується, а навпаки прогресивно збільшується, що іноді приводить до втрат людського життя, втрат судна, великим економічним витратам [18], тимчасовим припиненням судноплавства в окремих районах [19, 20], забрудненню довкілля [21, 22] та втратами вантажу [23, 24].

Досвід використання штучного інтелекту на практиці, та втручання його в постійний алгоритм вирішення та визначення проблем, представлено в роботі [25].

Дослідження перспективних автономних судових систем, призначених для автоматичного розрахунку безпечного маневру та застосування цього на практиці, ще все знаходиться в статусі тестового випробовування. Надання можливості використання та взаємодія зі штучним інтелектом у питаннях навігації може бути основною причиною підвищення безпеки та ефективності в судноплавстві.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є впровадження та метод взаємодії штучного інтелекту з навігаційним офіцером, щоб зменшити помилки людського фактору в ситуаціях надмірного зближення суден морського транспорту.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення маневрування судна, значною мірою залежить від своєчасного виявлення ситуації надмірного зближення та оперативного вибору правильного маневру ухилення. Виявлення та вибір маневру ухилення на судах морському транспорту, є фундаментальною навичкою та здібністю для навігаційного офіцера. Для координації маневрів розходження двох суден, в МППЗС-72 запроваджено логічну систему, яка враховує стан видимості. У разі гарної видимості взаємні обов'язки пари суден розподіляються залежно від їхнього статусу і характеристики обстановки їх наближення, як показано на рис. 1. Під час зниження видимості вимоги МППЗС-72 не передбачають взаємної відповідальності суден і регламентуються лише діями керуючого судна. Навігаційний офіцер повинен своєчасно визначити ситуацію наближення та вжити відповідних заходів для запобігання зіткненню суден.

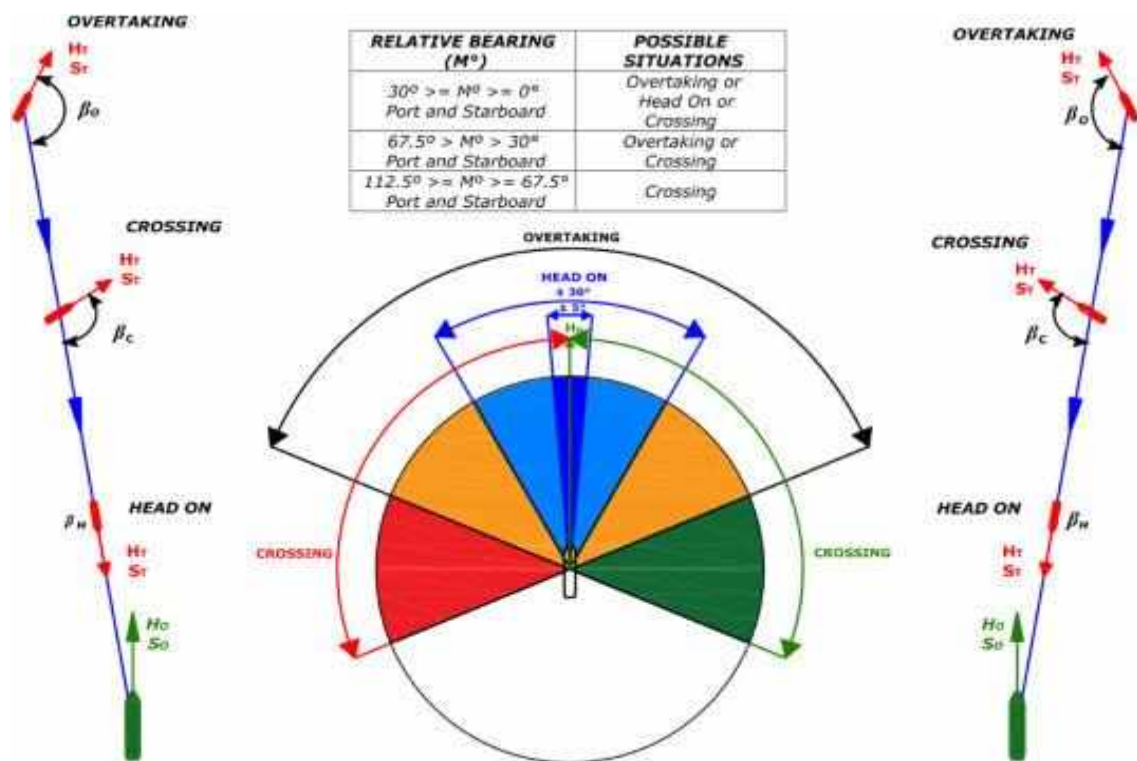


Рис. 1. Основні ситуації маневрування суден відповідно до МППЗС-72, які знаходяться на виду одне в одного

Згідно з даними Європейського агентства з безпеки на морі та їх щорічного огляду морських аварій та інцидентів на морі за 2014...2023 роки, як показано на рис. 2, найбільший відсоток зареєстрованих морських аварій та інцидентів відбулися у зоні «Внутрішніх вод» 51,5 %, за якою йдуть «Територіальні моря» з 24,3 % і «Відкрите море» з 20,8 %. Крім того, підкатегорія «Внутрішні води – портова зона» була територією з більшою кількістю випадків. Ці статистичні дані можуть свідчити про те, що через збільшення інтенсивності руху суден, особливо в прибережних районах, навігаційному офіцеру часто не вистачає часу для проведення своєчасного аналізу ситуацій, провести визначення пріоритетної цілі, та забезпечити безпечний та своєчасний маневр з іншими суднами.

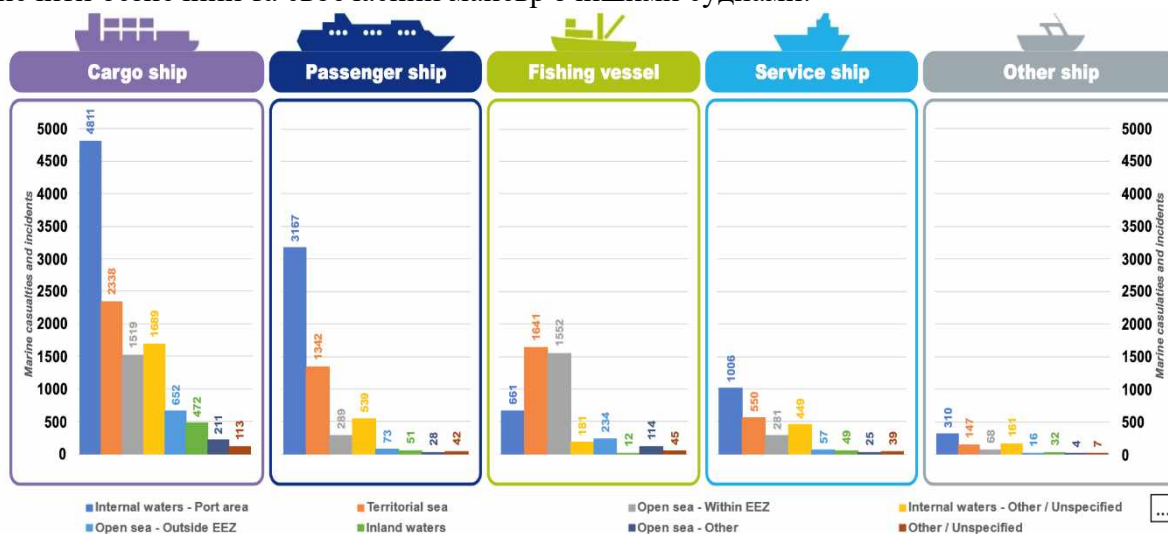


Рис. 2. Морські аварії та інциденти за період 2014...2022 рр., упорядковані за районом плавання та типом судна

Незважаючи на посилення контролю за безпекою судноплавства з боку систем управління руху суден, удосконалення системи управління безпекою компанії та регулярні курси підвищення кваліфікації для штурманів, зіткнення суден продовжують відбуватися і часто призводять до серйозних екологічних, фінансових і, перш за все небезпечних для життя наслідків. Відсоток інцидентів на суден за період з 2014 по 2022 рік, представлений на Європейській платформі інформації про нещасні випадки на морі, як показано на рис. 3, людський фактор був основним із наслідків нещасних подій з 59,1 % від загальної кількості, за нею йдуть відмови системи/обладнання з 25,3 %, дії іншого судна з 8,4 %, наслідки небезпечного матеріалу з 5,3 % і невідомі з 1,9 %.

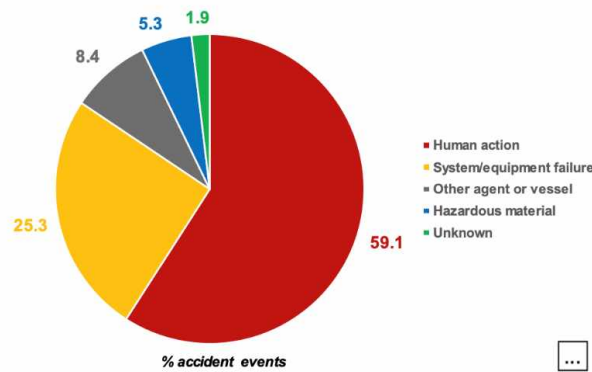


Рис. 3. Відсоток аварійних подій за період 2014...2022 рр. за видами аварійних подій

Основною ідеєю цієї статті є впровадження та метод взаємодії штучного інтелекту з навігаційним офіцером, щоб зменшити помилки людського фактору в ситуаціях надмірного зближення суден. Штучний інтелект відноситься до комп'ютерних систем, які можуть виконувати завдання, зазвичай пов'язані з когнітивними функціями людини. Як правило, системи штучного інтелекту навчаються, як це робити, обробляючи величезні обсяги даних і шукаючи шаблони для моделювання у власному прийнятті рішень, як показано на рис. 4. У багатьох випадках оператори контролюватимуть процес навчання штучного інтелекту, підкріплюючи правильні рішення та перешкоджаючи невірним.

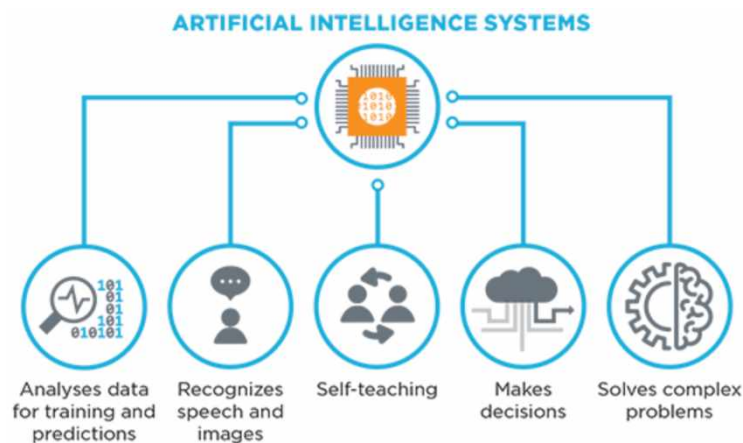


Рис. 4. Процес взаємодії зі штучним інтелектом

Величезний обсяг навігаційної інформації, яку навігаційний офіцер повинен проаналізувати за короткий проміжок часу, штучний інтелект може проаналізувати та надати необхідну стислу інформацію та рекомендації за лічені секунди. Ці рекомендації від штучного інтелекту можуть враховувати такі фактори, як найбезпечніший і найефективніший маршрут, щоб уникнути потенційних небезпек або оптимізувати роботу судна. Протягом цього процесу

штучний інтелект служить інструментом, який допомагає штурману приймати обґрунтовані рішення щодо маневру розходження. Він може аналізувати величезні обсяги даних і надавати цінну інформацію за короткий час. Отримані результати та рекомендації від штучного інтелекту, штурман переглядає та беручи до уваги власний досвід, знання та знання конкретних обставин, зможе швидше та якісніше проаналізувати та прийняти остаточне рішення щодо маневру розходження, враховуючи не лише рекомендації штучного інтелекту, але й будь-які інші важливі фактори, які штучний інтелект міг не врахувати. Час, витрачений на аналіз ситуації, зіграє ключову роль в прийнятті рішення щодо маневру розходження суден та вплине на зменшення кількості аварійних подій у морі.

Одним із способів взаємодії штучного інтелекту з навігаційним офіцером є використання в реальному часі загальнодоступних програм із забезпеченням штучного інтелекту – Open AI, Chat GPT або Chat & Ask AI, які здатні обробляти будь-яке запитання та видавати сформульований, стислий відповідь у короткий проміжок часу. Використовуючи штучний інтелект у режимі реального часу, він діє як помічник навігаційного офіцера як чат-бот із генеративним штучним інтелектом, здатний працювати в інтерактивному режимі, аналізувати та керувати ланцюгом подій на основі неймовірної кількості доступної інформації. У майбутньому розвиток штучного інтелекту на морських судах затребує розробки власного програмного забезпечення, яке працюватиме з інформацією, що дозволить ще більше збільшити швидкість обробки даних та отримувати точніші результати. Однак на даний момент, враховуючи існуючі програми, можна використовувати штучний інтелект як тестовий і навчальний зразок.

Розглянемо змодельовану ситуацію зближення суден на маневреному планшеті, що йдуть прямо одне на одного (, і порівняємо отримані результати з рекомендаціями щодо розходження запропонованим штучним інтелектом. Судно прямує курсом 045 градусів (H^0) і швидкістю 10 вузлів, інше судно наближається курсом 225 градусів (H^T) зі швидкістю 12 вузлів. Відстань до зустрічного судна становить 9 морських миль. Необхідно розрахувати курс відхилення для розходження з іншим судном у дві морських милі. Результати, отримані з маневреного планшета, показують, що за умов миттєвих розрахунків, зроблених навігаційним офіцером, судну необхідно повернути на 27 градусів праворуч (H^1), як показано на рис. 5, щоб безпечно розійтись з судном на необхідній відстані в 2 милі.

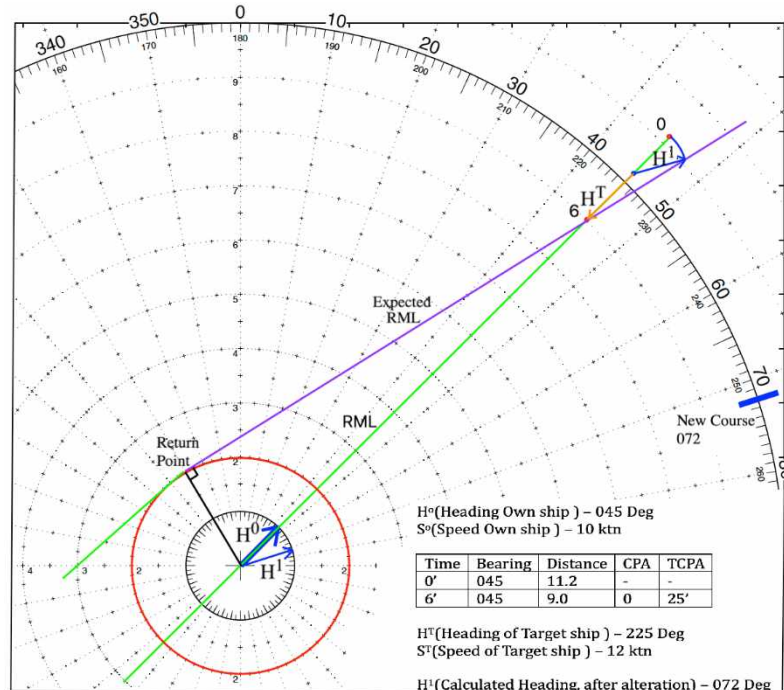


Рис. 5. Розрахунок маневру розходження за допомогою маневреного планшета

За допомогою програми зі штучним інтелектом та голосового помічника вводяться початкові вхідні дані та задаються необхідні параметри розходження. Також можливо текстове введення даних, але під час використання голосового помічника досягається суттєва економія часу. Після чого виконується порівняння отриманих результатів з розрахунками з маневреного планшета.

Me:
The ship is heading at 45 degrees and at a speed of 10 knots. Other ship is approaching the meeting with a heading of 225 degrees at a speed of 12 knots. the distance to the oncoming vessel is 9 nautical miles. calculate the ship's maneuver to the right so as to disperse by 2 miles.

Chat & Ask AI:
To calculate the ship's maneuver to the right in order to pass 2 miles to the right of the oncoming vessel, we can use trigonometry to find the change in course needed. First, we can find the time it will take for the two ships to meet using their speeds and the initial distance between them. Then, we can calculate the distance each ship will travel during that time, and use trigonometry to find the change in course needed for the first ship to pass 2 miles to the right of the oncoming vessel.

Step 1: Calculate the time to meet
The time it takes for the ships to meet can be found using the formula:
$$t = \frac{\text{distance}}{\text{relative speed}}$$

For the first ship:
$$t_1 = \frac{9 \text{ nautical miles}}{10 \text{ knots} + 12 \text{ knots}}$$

Step 2: Calculate the distance each ship travels during the time to meet
For the first ship:
$$d_1 = 10 \text{ knots} \times t_1$$

For the second ship:
$$d_2 = 12 \text{ knots} \times t_1$$

Step 3: Calculate the change in course for the first ship
The change in course needed for the first ship to pass 2 miles to the right of the

oncoming vessel can be found using trigonometry. We can use the fact that the ships are moving in straight lines and that the relative position between the two ships will form a right-angled triangle.

Let's denote:
$$a = 2 \text{ nautical miles}$$

$$b = 4.09 \text{ nautical miles}$$

$$\theta = \text{angle between original course and the new course}$$

We can use the tangent function to find the angle:
$$\tan(\theta) = \frac{a}{b}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$\theta \approx 26.6^\circ$$

So, the ship needs to change its course by approximately 26.6 degrees to the right in order to pass 2 miles to the right of the oncoming vessel.

Рис. 6. Розрахунок маневру розходження за допомогою штучного інтелекту

З наведеного вище прикладу можна зробити висновок, що для того, щоб забезпечити безпечне розходження з судном на необхідній відстані, необхідно відхилитися праворуч приблизно на 27 градусів. Результат, отриманий за допомогою розрахунків штучного інтелекту, становить 26,6 градусів, що майже збігається з фактичним розрахункам. Час, витрачений на розрахунки на маневровому планшеті, становитиме від 1 до кількох хвилин, залежно від навичок та досвіду навігаційного офіцера. У випадку зі штучним інтелектом результат буде отримано протягом кількох секунд, незалежно від досвіду навігаційного офіцера.

Висновки. Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Аналіз зіткнення суден за останні роки показав, що людський фактор є основною причиною, що призводить до аварійності суден. Інформаційний обсяг інформації, яку необхідно коректне та своєчасне проаналізувати навігаційному офіцеру в певних випадках перебільшують функціональні можливості людини.

2. Впровадження штучного інтелекту в повсякденне виконання обов'язків навігаційного офіцера може суттєво полегшити, а також убезпечити судно від можливих інцидентів. Система штучного інтелекту оброблятиме дані за допомогою алгоритмів і моделей для оцінки поточної ситуації та прогнозування потенційних майбутніх сценаріїв. Це може включати в себе аналіз ризиків зіткнення, оцінка впливу погоди і стану моря, і врахування маневрених можливостей судна.

3. Досліджуваний спосіб взаємодії навігаційного офіцера зі штучним інтелектом довів ефективність та переважання швидкості обчислення. Аналіз та розрахунок даних, для

попередження зіткнення, скорочується в часовому етапі на 10...20 разів, порівняно з натурними спостереженнями та розрахунками.

4. Пропонований метод використання штучного інтелекту в навігації значно зменшить помилки людського фактора при виборі маневру розбіжності.

5. Подальший розвиток та створення власного програмного забезпечення, на базі роботи штучного інтелекту в галузі навігації, може істотно мінімізувати випадки зіткнення суден у морі та дати великий поштовх для розвитку автономних безпілотних суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
3. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
4. Майданевич С.Б., Тимошук О.М. Суб'єкти та принципи міжнародного морського права // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
5. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
6. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
7. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
8. Ворохобин І.І. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
9. Ворохобин І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
10. Бурмака І.А., Ворохобин І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
11. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
12. Li S.J., Liu J.L., Negenborn R.R. Distributed coordination for collision avoidance of multiple ships considering ship maneuverability // Ocean Eng. – 2019. Vol. 181. – P. 212-226. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.054.

13. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
14. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
15. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
16. Бурмака А.И., Калюжний В.В. Имитационное моделирование процесса расхождения судов экстренным уклонением при чрезмерном сближении // *Судноводіння : науково-технічний збірник*. – 2019. – Вип. 29. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 37-46. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.37-46.
17. Бурмака И.А., Янчецкий А.В. Оценка вероятности степени опасности сближения судов // *Судноводіння : науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 27-33. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.27-33.
18. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
19. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
20. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
21. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // *Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2019. – Vol. 66(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
22. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // *Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2018. – Vol. 65(2). – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.
23. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna*. – 2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
24. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
25. Marr B., Ward M. *Artificial Intelligence in Practice*. – 2019. – TJ International Ltd, Padstow, Cornwall, UK. – 333 p.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin S.S. Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences *Water transport*. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С. 27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

3. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
4. Maydanevich S.B., Tymoshchuk O. Subjects and principles of the international maritime law // *Water transport*. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
5. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
6. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
7. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
8. Vorokhobin I. Impact of the cross-track error distribution law on safe navigation in narrow waters // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.58-66. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
9. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O.A. Method of electronic chart departmenisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
10. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.31. – P.80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
11. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
12. Li S.J., Liu J.L., Negenborn R.R. Distributed coordination for collision avoidance of multiple ships considering ship maneuverability // *Ocean Eng.* – 2019. Vol. 181. – P. 212-226. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.054.
13. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
14. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.
15. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01.
16. Burmaka I., Kaliuzhny V. Imitation design of process of divergence of vessels by urgent deviation at excessive rapprochement // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2019. – Vol. 29. – P.37-46. doi.org/10.31653/2306-5761.29.219.37-46.
17. Burmaka I., Yanchetskyy A. Probability estimation degree of danger vessels rapprochement // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.27-33. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.27-33.
18. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
19. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

20. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
21. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
22. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2018. – Vol. 65(2). – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.
23. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna. – 2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
24. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
25. Marr B., Ward M. Artificial Intelligence in Practice. – 2019. – TJ International Ltd, Padstow, Cornwall, UK. – 333 p.

Sagin S.S., Sagin S.V.

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE SITUATIONS OF EXCESSIVE VESSELS APPROACHING

Considered the methods of control and management of the movement of the vessel during maneuvering, in order to ensure a safe divergence, under the condition of interaction of the navigation officer with artificial intelligence. It is noted that the main cause of accidents at sea is the human factor, while in some cases the navigation officer cannot calculate in time the necessary maneuver for the safe vessel divergence. To solve the issue of ensuring the safety of navigation, the possibility of using artificial intelligence in the situation of excessive vessels approaching was considered, in accordance with the relevant norms of the international rules for preventing collisions of ships at sea, which establish the interaction of ships depending on the situation that arose during a dangerous rapprochement. It is determined that the navigation officer is able to input various data into the artificial intelligence system, such as the vessel's current position, speed, course, bearing, weather conditions and any other relevant information, in order for the artificial intelligence system to process this data using an algorithm and models for assessing the current situation and predicted the emergence of potential future scenarios. Artificial intelligence includes analysis of collision risks, assessment of the impact of weather and sea conditions, and also takes into account the maneuverability of the vessel. Based on its own analysis, the artificial intelligence system provides the navigation officer with recommended divergence maneuvers. These recommendations consider factors such as the safest and most efficient route, in order to avoid potential hazards or optimize the current route. Throughout this process, artificial intelligence has been identified as a tool that helps the navigation officer make informed decisions about the divergence maneuver and analyze a huge amount of data in a short amount of time. Through results and recommendations received from artificial intelligence, the navigation officer, taking into account his own experience, knowledge and specific circumstances, makes the final decision on the divergence maneuver. At the same time, any other important factors that could remain unaccounted for by artificial intelligence are also taken into account.

Key words: *artificial intelligence, decision-making, divergence maneuver, manoeuvring, maritime transport, navigation information, prevention of ship collisions, safety of navigation, ship movement, ship movement management, ship route.*

Дудченко С.В., Литовченко В.І.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ БЕЗПЕЧНОГО ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ЧАСОМ РУХУ МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ПРОГНОЗУ ПОГОДНИХ УМОВ

Управління рухом морських суден з використанням автоматичних систем, що дозволяють суттєво покращити показники якості та забезпечити безпеку плавання є невід'ємною частиною судноплавства сучасних умов. Нові шляхи вдосконалення систем автоматичного управління рухом здійснюється за рахунок широкого застосування передових комп'ютерних технологій. На даний момент однією з передових концепцій для створення систем автоматичного управління рухом є концепція e-Navigation та e-Voyage, як її частина. Сучасні судна можуть здійснювати плавання в складних погодних умовах, проте вітер, хвилі, течії та інші гідрометеорологічні фактори впливають на швидкість та маршрут суден, і як наслідок, на ефективність переходу. Рух судна з урахуванням погодних вимагає розробки оптимального маршруту переходу на основі прогнозів погоди, стану моря та індивідуальних характеристик судна для конкретних умов навігаційної обстановки. У визначених межах погодних і морських умов термін оптимальний використовується для позначення максимальної безпеки та комфорту екіпажу, мінімального споживання палива, мінімального часу на ходу або будь-якої бажаної комбінації цих факторів. У роботі удосконалено метод формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що дозволяє підвищити ефективність за часом переходу судна з урахуванням прогнозу погодних умов при формуванні безпечного маршруту в системі e-Navigation. В удосконаленому методі реалізоване сумісне застосування математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

Ключові слова: e-Navigation, e-Voyage, маршрут переходу, маршрутизація за погодою, оптимізація рейсу.

Постановка проблеми. Відповідно до Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS) [1], розроблення плану переходу судна вважається критично важливим для безпечної навігації та уникнення небезпечних ситуацій. Наявні в ІМО [2] інструкції, морські карти та публікації, що застосовуються в судноплавстві і в концепції Е-навігації [3], використовуються для забезпечення безпеки та ефективної навігації суден.

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

- точність прогнозування гідродинамічної поведінки судна за різних гідрометеорологічних умов;
- точність прогнозу погоди;
- можливість і практичність алгоритму оптимізації.

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

$$T_{route}^{sh} = \frac{D_{route}^{sh}}{V^{sh}}, \quad (1)$$

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

D_{route}^{sh} – довжина маршруту W_{route}^{sh} ;

V^{sh} – задана швидкість судна.

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

$$T_{route}^{sh} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^{sh}}{v_i^{sh}}, \quad (2)$$

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

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

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

Відповідно до виразу (2), маршрут переходу судна визначимо множиною точок (пунктів) маршруту, що утворюють траєкторію судна, та пов'язаним з ними часом проходження (рис. 1).

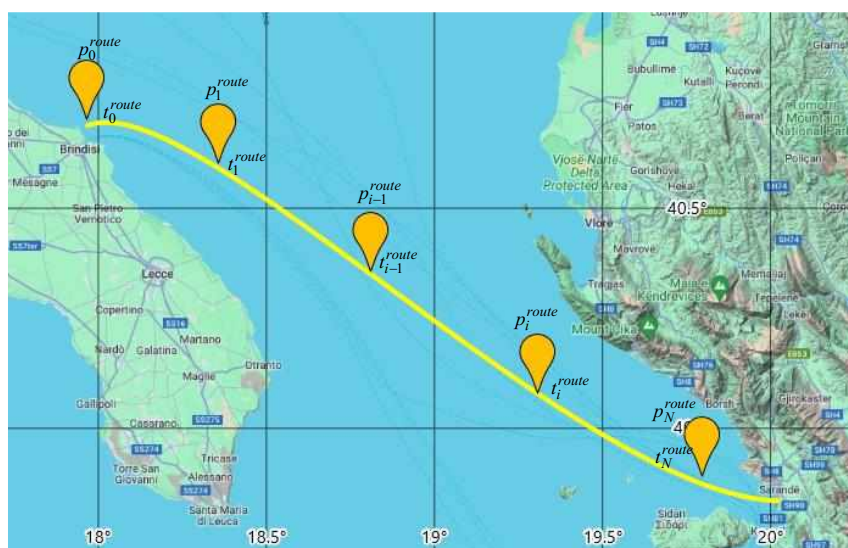


Рисунок 1 – Множина точок (пунктів маршруту), що утворюють траєкторію судна

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

$$p_i^{route} = \left[Cord_i^{W_{route}^{sh}}, t_i^{route} \right], \quad (3)$$

який представляє довготу, широту та час відповідно проходження даного пункту маршруту.
Вектор управління судном задамо:

$$U^{ship} = \left[u_1^{sh}, \dots, u_{i-1}^{sh}, \dots, u_i^{sh}, \dots, u_N^{sh} \right] \quad (4)$$

при

$$u_i^{sh} = \left[v_i^{sh}, h_i^{sh} \right], \quad (5)$$

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

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

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

$$INF_i = \left[inf_i^{wind}, inf_i^{curr}, inf_i^{wave} \right], \quad (6)$$

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

$inf_i^{curr} = \left[\beta_i^{curr}, v_i^{curr} \right]$ – вектор, що визначає напрям (β_i^{curr}) та швидкість (v_i^{curr}) течії між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

$inf_i^{wave} = \left[h^{wave}, \beta^{wave} \right]$ – вектор, що визначає висоту (h^{wave}) та напрям (β^{wave}) хвиль між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

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

$$\begin{cases} T_{route}^{sh} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^N t_i^{route} \leq T_{dest}^{route}; \\ p_i^{route} \in MR, \quad i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (7)$$

де MR – район плавання в якому забезпечується рівень безпеки не нижче заданого;

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

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [4] реалізована одночасна оптимізація курсу та швидкості судна для всього переходу в межах розрахункового часу прибуття, що забезпечує безпечне та енергозберігаюче плавання завдяки належному плануванню маршруту та швидкості. Пропонується модель одночасної оптимізації для курсу та швидкості судна на основі налаштованої версії алгоритму A*, оптимізація вирішується в симуляції.

У дослідженні [5] пропонується підхід до ідентифікації та характеристики маршрутів руху судна з використанням інформації, що міститься в повідомленнях автоматичної ідентифікаційної системи, які передаються суднами та записуються береговим центром служби руху суден. Підхід полягає у використанні архівних даних автоматичної системи ідентифікації для побудови графіка, де вузли є клітинками сітки, що охоплює географічну область, що вивчається, а ваги спрямованих країв обернено пропорційні руху суден між клітинками. Для визначення потенційно безпечного маршруту, який вважається найбільш використовуваним маршрутом між двома місцями використовується алгоритм Дейкстри.

У статті [6] пропонується метод оптимізації маршруту за часом та розкладу судноплавства шляхом включення часових вікон порту. Було розроблено математичну модель програмування, щоб мінімізувати загальні експлуатаційні витрати перевізника шляхом часової оптимізації послідовності заходу в порт, часу прибуття судна в порт заходу та швидкості руху на етапі переходу відповідно до обмежень часового вікна порту.

Метою дослідження [7] є визначення оптимального диверсифікації швидкості залежно від кількості вантажу на судні та стану вітру та моря. У цьому контексті були використані дані про однорічну подорож двох модельних однорідних вантажних суден, включаючи добову швидкість судна, добове споживання палива, споживання баластної води, загальне споживання вантажу судном, стан моря та стан вітру. Для визначення оптимальної швидкості різноманітності використовували метод генетичного алгоритму.

У роботі [8] оцінювалися служби "STM", які відносяться до категорії інформаційних систем призначених для покращення обміну інформацією між судном та берегом. Ці дослідження надає інформацію для центрів VTS, на які може вплинути впровадження e-Navigation.

У статті [9] авторами розроблений метод декомпозиції маршруту судна на глобальне та локальне планування за допомогою MATLAB і Simulink. У ході проекту "ROUTING" розглядається маршрутизація судна з урахуванням погодних умов та сучасний стан чисельного моделювання прогнозу погоди (NWP).

У роботі [10] пропонується ретельний огляд існуючих метеорологічних служб і детальна інформація про те, як отримати доступ до даних, які пропонують ці служби. Незважаючи на те, огляд виконувався на основі трансокеанських маршрутів суден, проте, він також буде корисним для ряду інших застосувань.

У дослідження [11] автори запропонувати метаевристичний алгоритм оптимізації бінарного рою частинок (BPSO), щоб отримати оптимізоване рішення для маршрутизації суден і планування транспортування зрідженого природного газу.

У дослідженні [12] пропонується метод формування маршрутів суден на інформації про попередні переходи. Інформація про попередні маршрути судна отримуються шляхом обробки даних AIS. Поворотні пункти маршруту судна згруповуються у вузли. Для створення оптимізованого маршруту використовувався алгоритм мурашиної колонії.

У статті [13] використовуються три різні алгоритми для порівняння продуктивності вирішення задачі комівояжера. Результати показують, що генетичний алгоритм забезпечує маршрут знаходження оптимального маршруту.

У статті [14] описано реалізацію комплексного програмного забезпечення "SIMROUTE" для маршрутизації судна з урахуванням погодних умов, яке називається. Для оптимізації

маршруту плавання як функції дії хвилі використовується алгоритм пошуку шляху A*. Програмне забезпечення надає комплексний, відкритий інструмент, що включає попередню та післяробку в при формуванні маршруту судна. Програмне забезпечення розроблено з урахуванням систем прогнозування хвиль CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), які доступні для безкоштовного використання.

У роботі [15] розглядається проблем оптимізації швидкості переходу судна, залежних в умовах ліміту часу. Запропоновано авторами підхід застосовує схеми апроксимації. За допомогою експериментів перевірено ефективність запропонованого підходу з точки зору пошуку майже оптимальних рішень за короткий час обчислень.

Метою дослідження є підвищення ефективності за часом переходу судна з урахуванням прогнозу погодних умов при формуванні безпечного маршруту в системі e-Navigation.

Основні результати дослідження. На рис. 2 показано узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна, який складається з таких елементів:

- модель району плавання, а саме з врахуванням прогнозу змін гідрометеорологічних умов в районі плавання;
- модель судна: оцінка впливу навколишнього середовища на маневрені та технічні характеристики судна;
- обмеження: можуть бути залежними від часу чи ні, повинні бути задоволені при оптимізації маршруту (заборонені зони, канали, загальна тривалість рейсу, зміни потужності двигуна тощо) та безпеки (максимальні рухи судна та погодні умови);
- цілі: залежно від експлуатації судна, необхідно оптимізувати різні критерії, одночасно чи ні, такі як тривалість рейсу, споживання палива, безпека тощо.

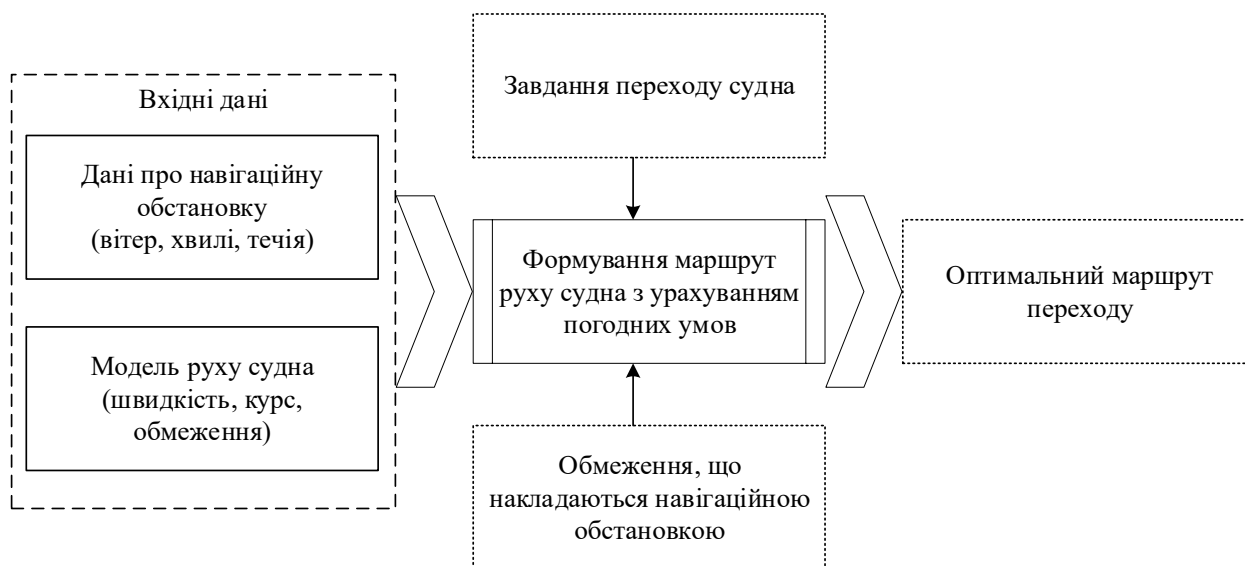


Рис. 2 – Узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна

При вирішенні завдання оптимізації накладаються обмеження, а саме, у поточній навігаційній ситуації навігації маршрут має відповідати:

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

4. Тривалість часового кроку зміни гідрометеорологічних умов, для моделювання навігаційної обстановки збігається з прогнозованим інтервалом в 1 годину. Даний інтервал дозволяє зробити припущення щодо стаціонарності цих умов. Функція керування (тобто швидкість і курс) є кусково-постійною протягом цього кроку часу. Прискорення не враховуються. Перехідні процеси, що пов'язані зі зміною керуючого впливу (наприклад, зміни

в режимі роботи двигуна), дуже короткі відносно масштабу часу, тому ними можна знехтувати. Компоненти опору руху судна, а саме: лобовий опір, опір повітря, диферентний або опір керму) не враховуються, оскільки вони є відносно невеликі за величиною.

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

У морській практиці замість того, щоб розглядати вплив на судно додаткового опору через криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна, основними параметрами, що використовуються для розрахунку зниження швидкості судна, є висота та напрямок хвиль та коефіцієнт ефективності судна (рис. 3). Вплив хвиль на швидкість руху судна визначається виразом:

$$V_{wave}^{sh} = V^{sh} - \left(0,75h^{wave} - 0,275 \cdot \delta^{wave} \cdot h^{wave} \right) \times \left(1,0 - 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot M^{sh} V^{sh} \right), \quad (8)$$

де δ^{wave} – кут між напрямком хвиль та курсом судна;

M^{sh} – тоннажність судна.

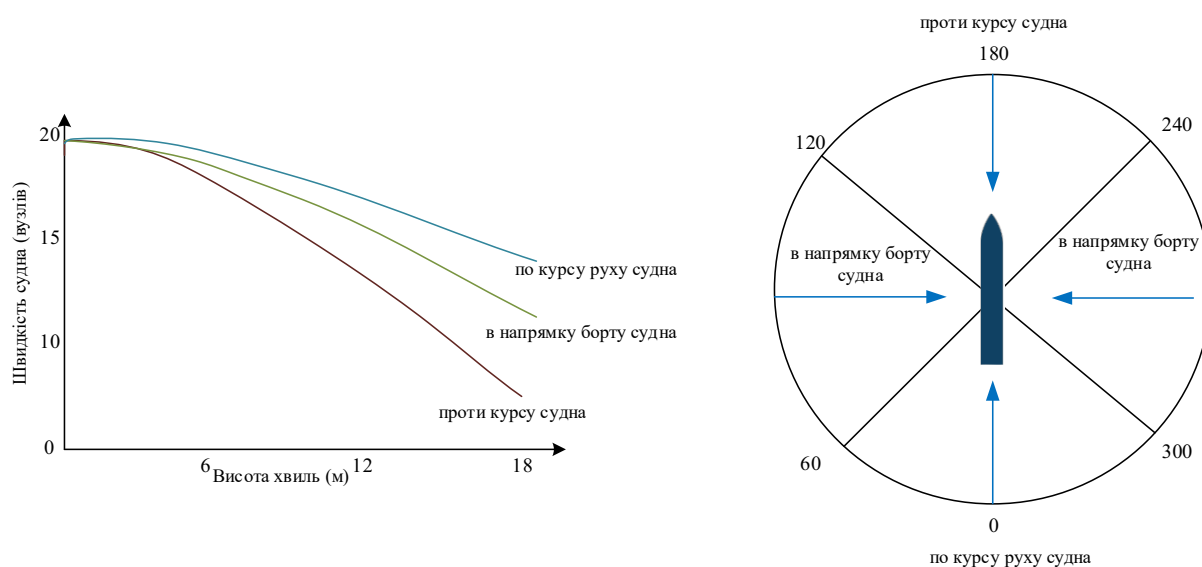


Рисунок 3 – Криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна

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

$$V_{curr}^{sh} = \left| \overrightarrow{V^{sh}} - \overrightarrow{V_i^{curr}} \right|. \quad (9)$$

Сили та моменти вітру, що діють на корпус і надбудову судна, можуть значно впливати на досягнення певної швидкості. Співвідношення швидкості вітру v_i^{wind} та швидкості судна

відносно поверхні води V_{curr}^{sh} дозволяє визначити швидкість судна з урахуванням вітру V_{wind}^{sh} . У загальному вигляді співвідношення у двовимірному просторі відповідно має вид:

$$V_{wind}^{sh} = \left| \overrightarrow{V_{curr}^{sh}} - \overrightarrow{V_i^{wind}} \right|. \quad (10)$$

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

$$V_{INF}^{sh} = V_{wind}^{sh} - V_{wave}^{sh}. \quad (11)$$

При формуванні маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, також, зазвичай лише рівняння руху в поздовжньому напрямку. Отже, загальний опір судна має бути збалансований відповідною тягою гвинта. Як правило, нехтують силами поперечного дрейфу, що впливають на курс і необхідний кут керма, що створює зусилля на кермо та може додатково збільшити опір. Тому модель поздовжнього руху судна можна показати так, як зображено на рис. 4:

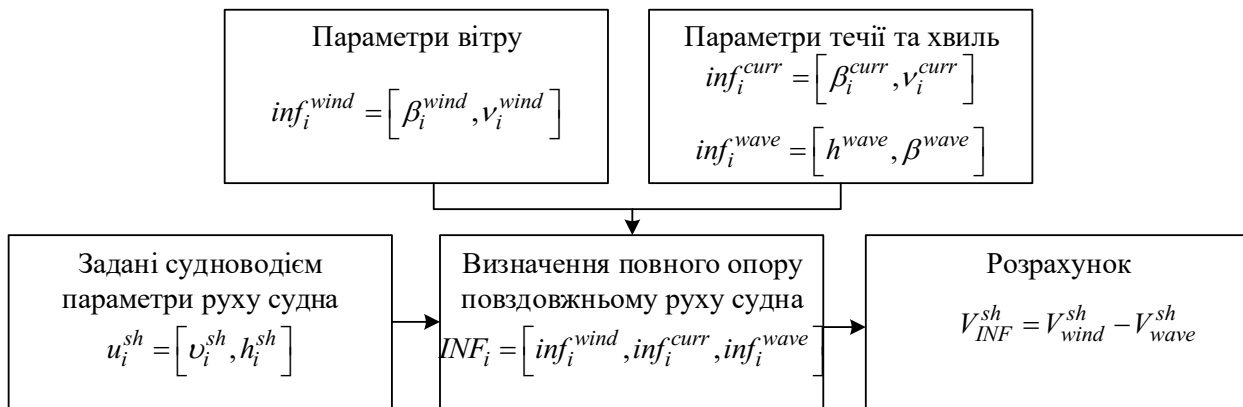


Рисунок 4 – Узагальнена модель поздовжнього руху судна

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

Для формалізації моделі поздовжнього руху судна пропонується застосовувати математичний апарат нечіткої логіки. Основу нечітких продукційних моделей складає база знань, що застосовується для визначення впливу повного опору на поздовжній рух судна.

Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов в процесі планування та виконання переходу, показано на рис. 5.

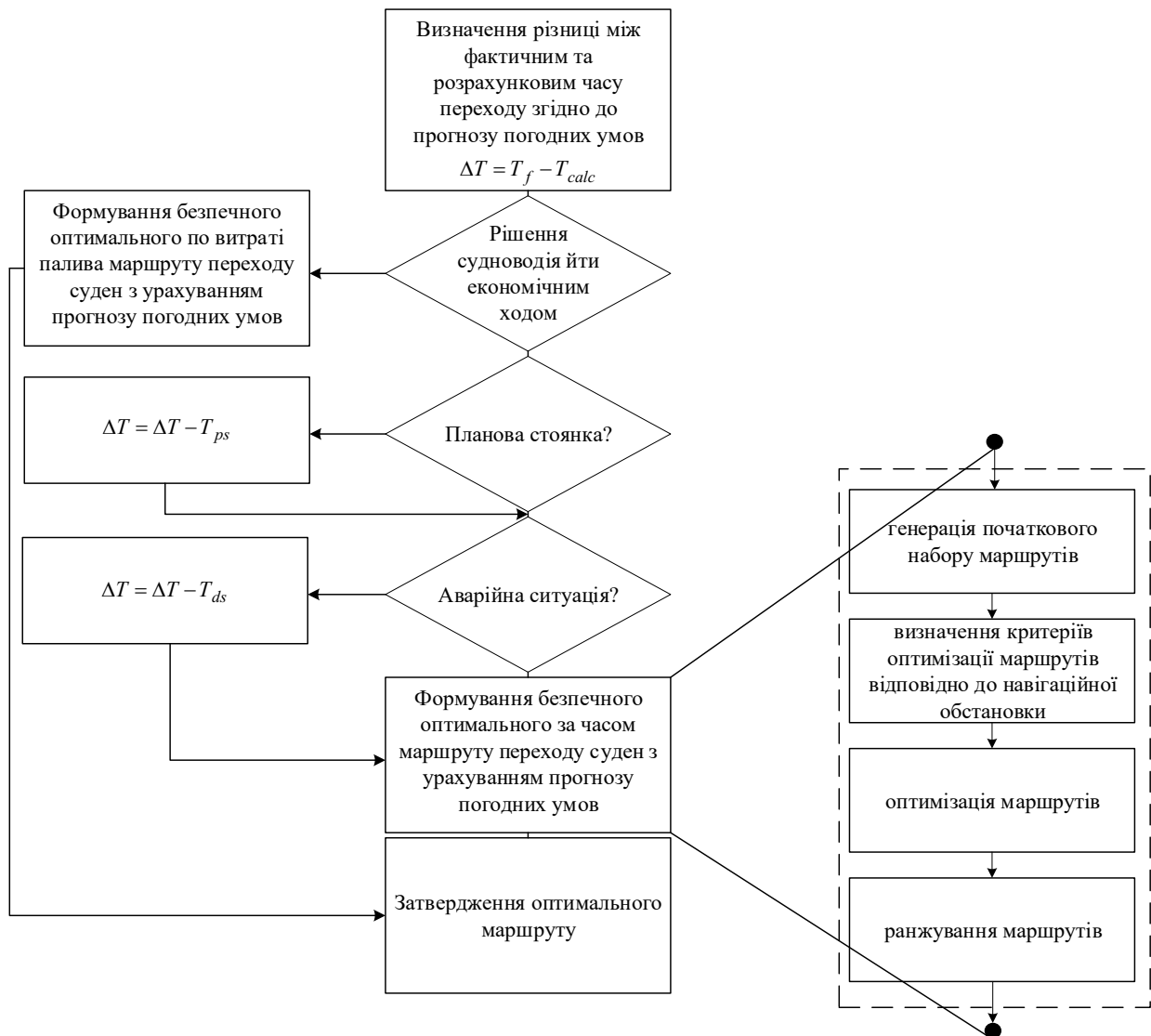


Рисунок 5 – Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

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

$$MR = \sum_1^n W_i^{rec}. \quad (12)$$

Далі вирішується завдання геометричного покриття визначеної області плавання MR за алгоритмом покриття гексагональної сіткою [16] в декілька кроків.

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

Крок другий: будується початковий та кінцевий гексагональний растр. Оскільки берегові служби оновлюють інформацію про гідрометеорологічну обстановку один раз на годину, то за

відстань між центрами сусідніх гексагональних растрів пропонується брати дистанцію, що проходить судно за одну годину (T^{hour}) з мінімальною швидкістю (V_{min}^{sh}) відносно поверхні землі. Звідси відстань (D^{geks}) від центру гексагонального растру до його сторони визначається формулою:

$$D^{geks} = V_{min}^{sh} \cdot T^{hour}. \quad (13)$$

Враховуючи властивість гексагональних растрів, а саме:

$$D^{geks} = l^{geks} \cdot \sqrt{3}, \quad (14)$$

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

$$l^{geks} = \frac{V_{min}^{sh} \cdot T^{hour}}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Загальна структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання MR має вид (рис. 6):

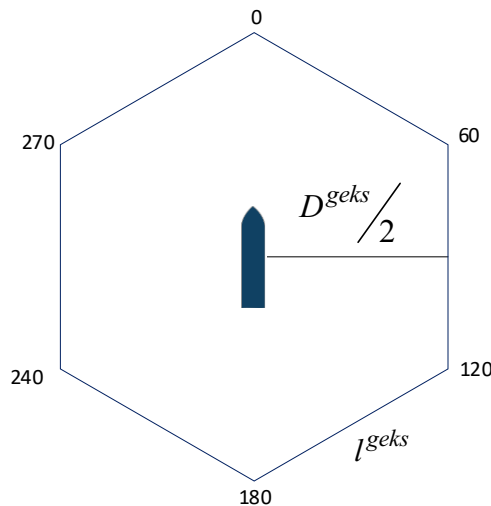


Рисунок 6 – Структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання

Крок третій: Визначається орієнтація гексагональних растрів. Для даного етапу застосовуємо *pointy top* орієнтацію [16], що дозволяє орієнтувати гексагональні растри у напрямку руху судна до центру цільового гексагонального растру (рис. 7). Дане орієнтування гексагональних растрів дозволяє максимально вписати гексагональну сітку в область плавання MR .

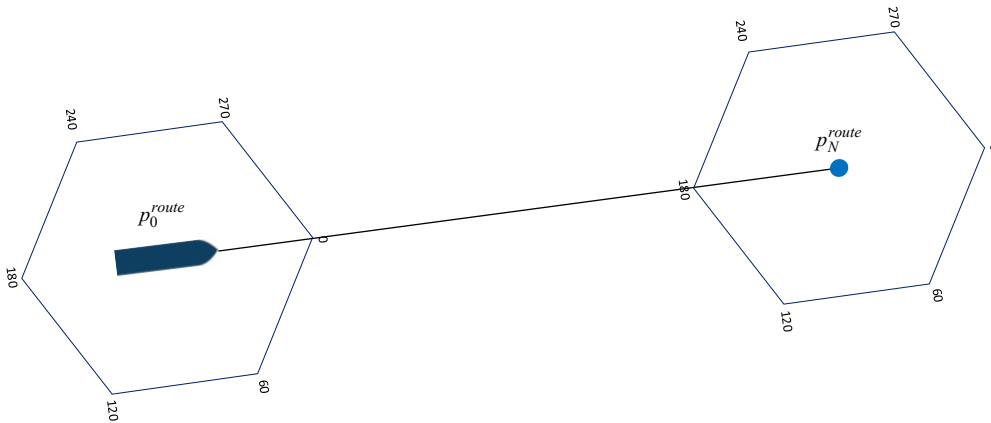


Рисунок 7 – Орієнтація початкового та кінцевого гексагонального растрів відповідно до напрямку центра цільового гексагонального растру

Крок четвертий: Виконується побудова гексагональної сітки в заданій області плавання методом осевих координат (рис. 8) [17].

Крок п'ятий: Виключення зі гексагональної сітки растрів що належать до області плавання зі складними (небезпечними) гідрометеорологічними умовами. Побудова маршрутів від початкового растру до цільового (рис. 8). Виконується методом формування векторів на гексагональному растрі. Для продовження маршруту вибирається той сусідній растр в якому при заданому курсі судна в растрі $\in V_{INF}^{sh} \rightarrow \max$. Відповідно кожен растр задається кортежем:

$$G = \langle D^{geks}, l^{geks}, V_{INF}^{sh} \rangle. \quad (16)$$



Рисунок 8 – Генерація початкового набору маршрутів

Критерій, що застосовується для вибору оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов застосовується вираз (7). Проте, в якості обмеження судноводій може задати максимальну витрату палива в ході переходу по маршруту. Відповідно до значень T_{route}^{sh} виконується ранжування маршрутів та вибір оптимального судноводієм для прокладки. Після оновлення інформації про гідрометеорологічних умов в районі плавання виконується перерахунок V_{INF}^{sh} растрів та визначаються нові маршрути, якщо це потрібно.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Топалов В.П. Конвенция СОЛАС-74. Основные положения и комментарии (Практическое пособие) / Одесса: Астропринт, 2002. 288 с.
2. R. Becker-Hei Webns Voyage Planning with ECDIS / Bremen: Geomares, 2016. 193 p.
3. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за ред. В. Чимшира / Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.
4. Li, Y., Cui, J., Zhang, X., Yang, X. (2023) A Ship route planning method under the sailing time constraint. International journal on marine navigation and safety of sea transportation. Vol. 11, 1242-1267. DOI <https://doi.org/10.3390/jmse11061242>.
5. Silveira, P., Teixeira. A. P., Guedes Soares. C. (2019) AIS based shipping routes using the dijkstra algorithm. J. Mar. Sci. Eng. Vol. 13, No 3. P. 565-571. DOI: 10.12716/1001.13.03.11
6. Jiang, Xi, Haijun, Mao, Zhang, Hao (2020) Simultaneous optimization of the liner shipping route and ship schedule designs with time windows. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2020. P. 1-11.
7. Baştürk, S., Erol, S. (2023) Optimizing ship speed depending on cargo and wind-sea conditions for sustainable blue growth and climate change mitigation. Journal of Marine Science and Technology. Vol. 28. P. 659-674.
8. Aylward, K., Johannesson, A., Weber, R., MacKinnon, S., Lundh, M. (2020) An evaluation of low-level automation navigation functions upon vessel traffic services work practices. WMU Journal of Maritime Affairs. Vol. 19. P. 313-335. DOI:10.1007/s13437-020-00206-y.
9. Kupraty, O., Tomera, M. (2023) Global and Local Planning of Ship Route Using MATLAB And Simulink. Journal of Marine Science and Technology. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation Vol. 17 No 1. P. 205-215. DOI:10.12716/1001.17.01.23.
10. Kupraty, O., Tomera, M. (2019) Review of weather forecast services for ship routing purposes. Journal of Marine Science and Technology. Polish maritime research. Vol. 26 No 4(104). P. 80-89.
11. Yazdi, A. K., Kaviani, M. A., Emrouznejad, A., Sahebi, H. (2020) Binary particle swarm optimization algorithm for ship routing and scheduling of liquefied natural gas transportation. The International Journal of Transportation Research. Vo. 12, No 4. P.223-232.
12. He, Y.K., Zhang, D., Zhang, J.F. & M.Y. Zhang. (2019) Ship route planning using historical trajectories derived from AIS data. The International Journal of Transportation Research. Vol. 13, No 1. P.69-76.
13. Li, X., Sun, B., Jin, J., Ding, J. (2022) Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading: turning point-time segmentation method. J. Mar. Sci. Eng., Vol 10, P.1835-1856. DOI: 10.3390/jmse10121835
14. Grifoll, M., Bor'en, C., Castells-Sanabra, M. (2022) A comprehensive ship weather routing system using CMEMS products and A* algorithm. Ocean Engineering. Vol 255, P.1-15. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111427.
15. Sung, I., Nielsen, P. (2020) Speed optimization algorithm with routing to minimize fuel consumption under time-dependent travel conditions. Production & manufacturing research. Vol. 8, No. 1, P.1-19. DOI: 10.1080/21693277.2020.1732848.

16. Мельник, О.В., Романюк, О.Н., Котлик, С.В., Романюк, С.О. Чехмestрук, Р.Ю. (2022) Методи підвищення продуктивності формування векторів на гексагональному растрі. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Vol. 14, Is. 3, P.28-39.
17. Ke, Y. (2023) Comparative analysis of path planning algorithms and prospects for practical application. Highlights in Science, Engineering and Technol. Vol. 52, P.202-207.

Dudchenko S.V., Lytovchenko V.I.

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR FORMATION OF A SAFE OPTIMAL ROUTE FOR VESSEL PASSAGE TAKING INTO ACCOUNT THE FORECAST OF WEATHER CONDITIONS, OPTIMAL DURING TRAFFIC TIME

Management of the movement of sea vessels using automatic systems that allow to significantly improve quality indicators and ensure navigation safety is an integral part of shipping in modern conditions. New ways of improving automatic traffic control systems are implemented due to the wide application of advanced computer technologies. At the moment, one of the advanced concepts for creating automatic traffic control systems is the concept of e-Navigation and e-Voyage, as part of it. Modern ships can sail in difficult weather conditions, but wind, waves, currents and other hydrometeorological factors affect the speed and route of ships, and as a result, the efficiency of the passage. The movement of the ship taking into account the weather conditions requires the development of an optimal passage route based on weather forecasts, sea conditions and individual characteristics of the ship for specific conditions of the navigational situation. Within defined limits of weather and sea conditions, the term optimum is used to denote maximum crew safety and comfort, minimum fuel consumption, minimum underway time, or any desired combination of these factors. In the work, the method of forming a safe optimal route of the passage of ships taking into account the forecast of weather conditions, optimal in terms of movement time, has been improved, which allows to increase the efficiency of the passage time of the vessel taking into account the forecast of weather conditions when forming a safe route in the e-Navigation system. In the improved method, the combined application and mathematical apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic is implemented to determine the possibilities of the ship's movement in accordance with the influence of hydrometeorological conditions. The proposed approach uses a hexagonal grid to approximate the swimming area and a system of production rules to determine the transition function between them.

Keywords: e-Navigation, e-Voyage, transit route, weather routing, voyage optimization.

УДК 656.025.6:621

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.24

Гаценко Л.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Дослідження містить результати розробки методу представлення радіоелектронних систем засобів водного транспорту залежно від параметрів контролю та діагностування. Для оцінювання впливу параметрів контролю та діагностування на достовірність визначення технічного стану радіоелектронних систем засобів водного транспорту удосконалено метод

синтезу вимірювальних сигналів на основі трикутної час-імпульсної модуляції та проведено дослідження впливу похибок вимірювання характеристик електричних сигналів енергопостачання на достовірність контролю та діагностування технічного стану радіоелектронних систем. Розроблено метод визначення параметрів контролю та діагностування радіоелектронних систем засобів водного транспорту на етапі експлуатації.

Ключові слова: діагностування, засоби водного транспорту, контроль, параметри контролю, показники ефективності контролю, радіоелектронні системи, технічний стан.

Постановка проблеми. Основною проблемою судноплавства в Україні є катастрофічне фізичне і моральне старіння основних фондів, насамперед, суден і портового обладнання. Це обумовлено тривалою експлуатацією ЗВТ та портового обладнання переважно без капітального ремонту. Сучасні методи і моделі контролю та діагностування технічного стану радіоелектронних систем засобів водного транспорту не дають бажаних результатів за таких причин. По-перше, не конкретизовані окремі питання експлуатації за технічним станом. По-друге, не враховані природно-кліматичні особливості експлуатації. По-третє, відсутні роботи, які присвячені контролю та діагностування технічного стану радіоелектронних систем після модернізації засобів водного транспорту для врахування впливу повноти і глибини контролю на достовірність визначення технічного стану із урахуванням якості обслуговування самих засобів контролю та діагностування при експлуатації. Таким чином, для підтримання високого рівня достовірності справного стану ЗВТ потрібно розробити (удосконалити існуючі) методи обґрунтування параметрів контролю та діагностування РЕС із складу таких засобів транспорту на етапі експлуатації.

Метою дослідження є визначення параметрів контролю та діагностування радіоелектронних систем засобів водного транспорту

Викладення основного матеріалу дослідження Розроблений метод представлення РЕС засобів водного транспорту залежно від параметрів контролю та діагностування дозволяє синтезувати оптимальні процедури контролю та діагностування [1].

При розробці методу за об'єкт контролю розглянуто окремі блоки (апаратура) у складі РЕС ЗВТ (типові елементи заміни), які можуть бути цифровими, аналоговими та цифро-аналоговими (гібридними).

Ступінь гібридності РЕС пропонується визначити за виразом:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} z_i^a p(z_i^a)}{(\sum_{i=1}^{n_a} z_i^a p(z_i^a) + \sum_{j=1}^{n_u} z_j^u p(z_j^u))_a} = \frac{\bar{N}_a}{(\bar{N}_a + \bar{N}_u)}, \quad (1)$$

де z_i^a, z_j^u – кількість аналогових і цифрових ТЕЗ у складі РЕС;

$p(z_i^a), p(z_j^u)$ – ймовірності появи дефектів ТЕЗ у складі РЕС j-го типу;

n_a, n_u – кількість типів аналогових і цифрових ТЕЗ у складі РЕС відповідно;

$\bar{N}_a, \bar{N}_u$ – середня кількість дефектів ТЕЗ в аналоговій та цифровій частинах РЕС.

Найбільшу ступінь гібридності згідно співвідношення (1) мають ТЕЗ РЕС, що характеризуються значенням $h = 0,5$. Типові елементи заміни РЕС з $h \geq 0,9$ будемо відносити до аналогових, а з $h \leq 0,1$ – до цифрових. Найбільш повно теорія діагностування розроблена для цифрових і аналогових ТЕЗ РЕС [2]. У загальному випадку до гібридних ТЕЗ РЕС відносять пасивні лінійні двополюсні елементи (конденсатори, резистори, котушки індуктивності); пасивні нелінійні двополюсні елементи (діоди, варистори тощо); елементарні багатополюсні елементи (транзистори, трансформатори, цифрові та аналогові інтегральні мікросхеми тощо); великі інтегральні схеми. Процес контролю гібридних ТЕЗ РЕС є більш складним завданням внаслідок їх конструктивних особливостей – високу щільність монтажу, частку поверхневого монтажу, труднощі або навіть неможливість доступу до контактів РЕС.

Знання закону розподілу дефектів (кількості типових елементів заміни з дефектами $m = \overline{0, M}$ у партії) впливає на вибір методів і засобів контролю, діагностування та ремонту РЕС та багато у чому визначає їх ефективність. Найчастіше дефекти ТЕЗ підпорядковуються біноміальному або пуассонівському закону розподілу. Якщо загальна кількість типових елементів заміни РЕС n є великою і серед них порівняно мало несправних, застосовується пуассонівський закон розподілу. При відносно великих n ймовірність p вибору несправного ТЕЗ радіоелектронної системи є відносно малою, а $\lambda = np$ набуває середніх значень. Тобто на практиці наближення Пуассона є справедливим, якщо значна кількість ТЕЗ радіоелектронної системи характеризується відносно малим рівнем несправності [3].

Тоді, у досліджуваній партії з N ТЕЗ, відповідно до пуассонівського закону розподілу, N_m типових елементів заміни РЕС з m дефектами мають $\bar{N}_m = \frac{\lambda^m e^{-\lambda} N}{m!}$ дефектів, що припадають на один зразок РЕС. Відповідно, кількість типових елементів заміни РЕС без дефектів ($m = 0$) дорівнює $\bar{N}_0 = N e^{-\lambda}$, а кількість дефектних типових елементів заміни – $\bar{N} = (1 - e^{-\lambda})N$.

Розподіл певних видів дефектів у партії ТЕЗ визначається як:

$$P_m = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)^m e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)}}{m!} = \frac{e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)} \sum_{j=1}^m C_m^j \lambda_1^{m-j} \lambda_2^j}{m!}, \quad (2)$$

де λ_1 і λ_2 – середня кількість дефектів першого та другого видів в одному ТЕЗ досліджуваної партії;

C_m^j – біноміальний коефіцієнт.

Вибір найефективніших методів і засобів діагностування та ремонту об'єкта контролю визначається згідно виразу (2). При цьому враховуються переважаючий клас і середня кількість дефектів λ , ступінь гібридності S_h , закон розподілу дефектів між типовими елементами заміни досліджуваної партії, конструктивні особливості друкованих плат тощо.

Для контролю та діагностування типових елементів заміни РЕС використовуються методи інспекції та методи тестового діагностування. У свою чергу, до методів інспекції РЕС відносять оптичні, радіаційні та рефлектометричні, а до методів тестового діагностування – функціональне тестове діагностування та внутрішньосхемне тестування [4].

Методи інспекції є безконтактними та застосовуються для виявлення стану поверхні типових елементів заміни, а саме:

- виявлення пошкоджень провідників друкованих плат;
- зміни конфігурації та взаємного розташування ТЕЗ;
- виявлення сторонніх включень, перекосів встановлених ТЕЗ.

Рефлектометричний метод (вимірюванням часових характеристик відбитого імпульсу) застосовується для друкованих плат у височастотних пристроях, коли поряд зі звичайним опором доріжки на платі також ще контролюється її хвильовий опір (імпеданс).

Функціональне тестування має на меті контроль вихідних параметрів ТЕЗ і тестування РЕС у цілому, завдяки чому перевіряються цілісність структури і правильність виконання відповідних функцій. Тестове обладнання з'єднується із ТЕЗ через спеціальні пробники (кліпси). Після подачі Стимулюючі впливи (тестові сигнали) на входах типового елемента заміни викликають на внутрішньосхемних контрольних точках і виходах ТЕЗ відповідні відклики, які вимірюються і порівнюються з еталонними значеннями.

Внутрішньосхемне тестування (аналогове та цифрове) типових елементів заміни проводиться при цілісності складових РЕС подачею тестових впливів на внутрішні контрольні точки апаратури. Аналогове внутрішньосхемне тестування РЕС передбачає контроль:

- коротких замикань та обривів;
- номіналів резисторів, конденсаторів, котушок, дискретних напівпровідникових приладів;
- правильність монтажу інтегральних мікросхем.

Для виключення впливу паралельних ланцюгів установлюється блокуюча напруга, застосовується метод багатодітного вимірювання, підбираються напруги і частоти тестування. Аналогове внутрішньосхемне тестування виявляє до 80% всіх дефектів та поділяється на такі види: за елементами, за фрагментами та змішане. Інваріантність тестування РЕС реалізовується двома способами. Перший спосіб передбачає ідентифікацію дефектів без подачі напруги живлення на РЕС завдяки умовному електричному розподілу пасивних двополосників і багатополосників. Ідентифікація інших видів дефектів здійснюється другим способом, коли на входах активних РЕС тестові сигнали наводяться примусово. Для виявлення всіх несправностей (ушкоджень) РЕС під час тестування встановлюються чіткі початкові умови діагностування РЕС, використовується спеціальна послідовність перевірок та виключаються тестові сигнали, не обумовлені умовами застосування апаратури.

Для виключення взаємного впливу елементів РЕС один на одного при тестуванні за елементами кожний елемент перевіряється окремо при низьких амплітудах тестових сигналів. Даний вид діагностування є практично безпечним при будь-якому поєднанні дефектів у ТЕЗ. При реалізації методу діагностування за елементами вирішуються такі основні завдання:

- забезпечення доступу до внутрішніх контрольних точок РЕС;
- виключення впливу схеми при перевірці пасивних РЕС;
- захист активних РЕС від пошкодження при тестуванні.

При діагностуванні за елементами аналогових і цифрових інтегральних мікросхем зі складу РЕС тестові сигнали подаються безпосередньо на входи кожної схеми, а з виходів знімаються відповідні реакції [5].

Метод цифрового внутрішньосхемного тестування базується на векторному та безвекторному тестуванні цифрових інтегральних мікросхем. При векторному тестуванні цифрові інтегральні мікросхеми перевіряються на відповідність таблиці істинності. Вплив паралельно встановлених інтегральних мікросхем усувається шляхом подачі на вхід мікросхем імпульсів обмеженої тривалості [6].

Таким чином, завдяки сучасним методам і засобам контролю та діагностування РЕС ЗВТ проводиться їх повне тестування, яке, на жаль, має доволі великий час проведення і недостатню достовірність виявлення можливих відмов, що знижує надійність РЕС.

У результаті критичного аналізу основних методів контролю та діагностування типових елементів заміни радіоелектронних систем обґрунтовано перспективи використання методу контролю технічного стану радіоелектронних систем засобів водного транспорту за елементами.

Надійність РЕС ЗВТ на етапі проектування досягається вибором доцільно-образної структури та розумної надмірності засобу оперативного контролю, самовідновлення та ремонтпридатності. При експлуатації надійність елементів РЕС ЗВТ забезпечують засоби технічного контролю та діагностування. Але найбільшого ефекту вдається досягти при грамотному поєднанні заходів, що виконуються на кожному етапі життєвого циклу [7].

Доведено, що за допомогою алгоритмів (програм) попереджувального обслуговування параметри контролю РЕС ЗВТ підтримуються у заданих межах або при виявленні відхилення цих параметрів від номіналів – корегуються, що позитивно впливає на надійність РЕС ЗВТ. Результати контролю технічного стану РЕС ЗВТ за точністю та частотним діапазоном (в області низьких частот огинаючої та несучої), отримані за допомогою прецизійних методів формування амплітудно-модульованих (АМ) сигналів в області низьких частот огинаючої (до кількох кілогерц) та несучої (десятки кілогерц) [8], [9], є кращими за класичні аналогові методи формування АМ сигналів [10].

Однак навіть прецизійні методи не можуть забезпечити жорсткі вимоги щодо дискретності та похибки (порядку тисячних часток відсотка) завдання коефіцієнта амплітудної модуляції (КАМ) в області малих його значень (до 10%) [130]. Лише досягнення вказаних значень параметрів дозволяють отримати для високоточних приладів і систем з АМ необхідні чутливість і похибки для сучасних навігаційних систем засобів водного транспорту.

Таких результатів дозволяє досягти лише метод формування прецизійних АМ сигналів на

основі бінарної модуляції часових параметрів прямокутних імпульсів [11], [12], але й він не завжди забезпечує необхідні значення коефіцієнта гармонік огинаючої. Для його зменшення застосовують більш складні закони модуляції (трикутний, трапецеїдальний, шматково-ступінчастий) часових параметрів прямокутних імпульсів несучої.

Висновки. Отже, проведене дослідження свідчить, що застосування методу синтезу вимірювальних сигналів на основі трикутної час-імпульсної модуляції у вимірювальній апаратурі сприяє підвищенню точності та надійності останньої. Надалі це відбивається на підвищенні загальної ефективності експлуатації радіоелектронних систем засобів водного транспорту за рахунок своєчасного виявлення можливих відмов більш точною та надійною вимірювальною апаратурою. Це набуває особливої актуальності під час виконання рейсів засобами водного транспорту за встановленими маршрутами і є підставою для зниження матеріальних, фінансових і репутаційних втрат через можливі аварії, поломки, катастрофи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hatsenko L., Olkhovikov D. Method of representation of radio electronic systems of water vehicles depending on control and diagnostic parameters // Znanstvena misel journal. – 2022. – № 69/2022. – Pp. 37-41. – <https://doi.org/10.5281/zenodo.7009159>.
2. Daki O., Herasimov S. & Zubrytskyi H. (2020) Digital Correlation Method For Power Measurement. Information Processing Systems, № 4 (163), с. 15–26, <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.02>.
3. ISO 9000:2005. Quality management systems – Fundamentals and Vocabulary. Third edition 2005-05-15.
4. Ramakrishnan C.R., Sekar R. Model-Dased Analysis of Configuration Vulnerabilities – [електронний ресурс] – Режим доступа: [http://seclab.cs.sunisb.edu/sec lab1/pubs/papers/widsoo.pdf](http://seclab.cs.sunisb.edu/sec%20lab1/pubs/papers/widsoo.pdf).
5. Jablon N.K., Adaptive Beamforming with the Generalized Sidelobe Canceller in presence of Array Imperfection, IEEE Trans. AP – 34, No.8, Aug.1986. – p.p. 996-1012.
6. Resolution IMO A. 817(19) adopted on 23/11/1995. Performance Standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). – p. 15.
7. Гаценко Л.В., Федотов Е.Г. Метод синтезу вимірювальних сигналів на основі трикутної час-імпульсної модуляції для контролю технічного стану радіоелектронних систем засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2021. – Випуск 3 (34). – С. 73-88. – <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.09>
8. Herasimov S, Borysenko M., Roshchupkin E.and etc. Spectrum Analyzer Based on a Dynamic Filter, J Electron Test, pp. 357–368, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05954-0>
9. International Electrotechnical commission (IEC). Technical committee № 65: Industrial Process Measurement and Control, Sub-Committee 65B.: Devices.IEC1131-Programmable Controllers. Part7 – Fuzzy control Programming Committee Draft Cd.1.0 (Rel.19.Jan.97).
- 10.
11. Saddik G.N. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system / G.N. Saddik, R.S. Singh, and E.R. Brown // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 7, pp. 1431-1437, July 2007
12. Sheyner O., Wing J., Lippman R., Haines J. Automated Generation and Analysis of Attak Graphs // In 2002 IEEE Symposium on Security and Privacy. – Oaklend, California, 2002 – <http://csse.usc.edu>.

Hatsenko L.

RESEARCH OF CONTROL PARAMETERS AND DIAGNOSTICS OF RADIO ELECTRONIC SYSTEMS OF WATER VEHICLES

The study contains the results of the development of a method of presenting radio-electronic systems of water transport vehicles depending on the parameters of control and diagnostics. In order to evaluate the influence of control and diagnostic parameters on the reliability of determining the technical condition of radio-electronic systems of water transport vehicles, the method of synthesis of measuring signals based on triangular time-pulse modulation was improved, and a study of the effect of measurement errors of the characteristics of electric power supply signals on the reliability of control and diagnosis of the technical condition of radio-electronic systems was carried out. A method of determining control parameters and diagnostics of radio-electronic systems of water transport vehicles at the stage of operation has been developed.

Key words: *diagnostics, means of water transport, control, control parameters, control efficiency indicators, radio-electronic systems, technical condition*

Медведєва О.Ю., Стросько Н.Г., Катрич А.В., Швайка М.О.

ПРИЩЕПЛЕННЯ КУЛЬТУРИ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ МАЙБУТНІМ ФАХІВЦЯМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

В сучасному світі, де водний транспорт відіграє ключову роль у міжнародній торгівлі, логістиці та розвитку економіки, актуальність вивчення та впровадження культури академічної доброчесності серед майбутніх фахівців водного транспорту стає невід'ємною. Задля забезпечення ефективного функціонування водного транспорту, збереження його репутації та посилення конкурентоспроможності на міжнародному рівні важливо не лише надавати здобувачам професійні навички, але й формувати в них вищі етичні стандарти.

У статті розглянуто особливості формування академічної доброчесності майбутніх фахівців водного транспорту як однієї з визначальних умов професійної підготовки здобувачів вищої освіти у межах освітнього процесу. Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, який готує майбутніх фахівців водного транспорту за освітньо-професійними програмами 271.01 «Навігація і управління морськими суднами», 271.02 «Управління судновими технічними системами і комплексами» та 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» значну увагу приділяє прищепленню та дотриманню правил і принципів академічної доброчесності в освітньому процесі та керується в цьому векторі своєї діяльності Положенням про систему забезпечення академічної доброчесності у ДУІТ [9]. Прищеплення принципів академічної доброчесності означає обов'язковість дотримання всіма учасниками освітнього процесу принципів чесної, відповідальної праці та навчання.

Ми проаналізували законодавчі і наукові джерела, в яких тлумачиться зміст поняття «академічна доброчесність». Проаналізувавши результати анонімного опитування здобувачів вищої освіти Дунайського інституту водного транспорту спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт і опрацювавши навчально-методичну літературу, ми окреслили перелік знань та вмінь із дотримання академічної доброчесності, якими має оволодіти майбутній фахівець водного транспорту у процесі підготовки до фахової діяльності.

Сучасний стан розвитку водного транспорту, який наразі є лідером за обсягами вантажних перевезень та забезпечує найнижчу їх собівартість, актуалізує важливість питань етики та академічної доброчесності у підготовці майбутніх фахівців цієї галузі. Проблеми та виклики, пов'язані з недостатнім рівнем культури академічної доброчесності, виступають в якості важливого вступу до дослідження, покликаного вирішити ці негативні тенденції та забезпечити стабільний розвиток галузі.

Ключові слова: заклад вищої освіти, здобувач вищої освіти, майбутні фахівці водного транспорту, академічна доброчесність, професійна підготовка, спеціальність, освітньо-професійна програма, етичний кодекс; морально-етична поведінка; прояви академічної недоброчесності; плагіат.

Постановка проблеми. В умовах інтеграції системи вищої освіти України до європейського освітнього простору все більшої актуальності набуває проблема підвищення якості підготовки майбутніх фахівців водного транспорту. Освітньо-професійні програми спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт побудовані на засадах

компетентнісного підходу, мають прикладну професійну орієнтацію та спрямовані на здобуття здобувачами знань, умінь, навичок та досвіду. Метою професійної підготовки майбутніх фахівців водного транспорту є надання вищої освіти для здійснення фахової діяльності у сфері морської галузі для підвищення іміджу національно-регіональної системи освіти фахівців морського та внутрішнього водного транспорту на міжнародному ринку праці. У процесі формування різних видів компетентностей здобувачів за всіма освітньо-професійними програмами, які реалізуються в Дунайському інституті водного транспорту, передбачено набуття здобувачами такої загальної компетентності, як «прагнення до підвищення рівня академічної доброчесності та культури, оволодіння навичками наукового мовлення та письма» [6].

З-поміж компетентностей, якими безумовно мають володіти майбутні фахівці водного транспорту, особливо хотілося б окремо відзначити саме етичну компетентність, тобто – прагнення до підвищення рівня академічної доброчесності та культури. Автори навчального посібника «Професійна етика» вважають, що «там, де представники певної професії в силу її специфіки перебувають в постійному або навіть безперервному спілкуванні з іншими людьми, існують специфічні «моральні кодекси» людей цих професій» [3, с.3]. Безперечно, все вище зазначене можна без жодних вагань застосувати і до професій водного транспорту.

Отже, можемо висновувати, що формування академічної доброчесності у здобувачів освіти, їх дотримання і доцільне застосування є вагомим складовою професійної підготовки майбутніх фахівців водного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ході аналізу останніх досліджень і публікацій вдалося виявити, що порушена нами проблема є актуальною для вищої освіти. Дослідження показали, що існують різні підходи до вирішення цього питання, включаючи впровадження етичних кодексів, організацію тренінгів та використання сучасних освітніх технологій. Важливо враховувати конкретні особливості галузі водного транспорту при розробці стратегій формування етичної культури здобувачів.

Основні засади академічної доброчесності відображені в таких документах, як Закон України «Про вищу освіту» (2014), Закон України «Про освіту» (2017), Рекомендації для ЗВО щодо розробки й упровадження університетської системи забезпечення академічної доброчесності (2019) [11, 10, 13]. З 2016 року з місією «формування нової академічної культури, яка базуватиметься на довірі, чесності, прозорості, реальному навчанні та справжній науковій роботі» [12, с. 5] в Україні реалізується Проект сприяння академічній доброчесності (Strengthening Academic Integrity in Ukraine Project — SAIUP) за підтримки Американських Рад із міжнародної освіти за сприяння Міністерства освіти і науки України та підтримки Посольства США в Україні.

Академічну доброчесність як основу сталого розвитку університетів в Україні досліджують Д. Сопова [15], Т. Фініков, А. Артюхов [2]. В. Сацик з позиції вивчення світового досвіду боротьби з академічною недоброчесністю пропонує низку заходів «для розбудови цілісної та ефективної системи забезпечення академічної доброчесності в українській вищій школі» [14]. Академічна доброчесність як імператив виживання університетської спільноти стала об'єктом уваги С. Курбатова [1]. О. Гужва всебічно аналізує питання академічної грамотності та етики [18]. І. Пак досліджує «феномен академічної культури, який є одночасно і чинником, і індикатором модернізації системи вітчизняної вищої освіти» [7, с. 323], що й зумовлює актуальність її наукових і соціологічних інтерпретацій, поглибленого аналізу структури, чинників та особливостей її формування [7, 8]. К. Шапунова аналізує законодавчі і наукові джерела щодо змісту поняття «академічна доброчесність» та акцентує на системності і послідовності формування цінностей академічної доброчесності у здобувачів вищої освіти [17]. К. В. Зозуля вивчає фактичний стан і фактори, що визначають академічну культуру навчально-пізнавальної діяльності здобувачів, та розглядає можливі шляхи підвищення її рівня в українських закладах вищої освіти, визнаючи його одним із пріоритетних напрямів у системі роботи вишів України [4]. М. Ячменик розглядає поняття академічної доброчесності крізь

призму європейських та вітчизняних документів, окреслює академічну доброчесність як основу якості освіти [19].

Отже, вище проведений аналіз останніх досліджень і публікацій за темою нашої статті засвідчує, що наразі освітянська українська і світова спільнота приділяють пильну увагу питанню академічної доброчесності, а проблема формування академічної доброчесності у майбутніх фахівців освіти під час професійної підготовки знаходить дедалі більше відображення у наукових дослідженнях.

Мета дослідження. У межах статті окреслимо засади формування академічної доброчесності майбутніх моряків у межах професійної підготовки, визначимо ставлення здобувачів до проявів академічної недоброчесності. Приділимо увагу ключовим аспектам, що визначають вплив на розвиток етичних цінностей у здобувачів, адже саме розуміння цих аспектів дозволяє ефективніше розробляти програми та стратегії формування культури академічної доброчесності, що враховують особливості водного транспорту.

Основні результати дослідження. Перед викладом основних результатів дослідження цілком логічним буде окреслити з урахуванням нормативно-законодавчих документів власне поняття «академічної доброчесності». Так, ст. 42 Закону України «Про освіту» засвідчує, що «академічна доброчесність – це сукупність етичних принципів та визначених законом правил, якими мають керуватися учасники освітнього процесу під час навчання, викладання та провадження наукової (творчої) діяльності з метою забезпечення довіри до результатів навчання та/або наукових (творчих) досягнень» [10].

Дотично до теми статті зазначимо, що Європейська хартія дослідників, упровадження якої було рекомендовано листом МОН України [5], містить розділ «Етичні принципи». У ньому акцентовано на обов'язковості дотримання науковцями етичних принципів та готовності нести покарання за їх порушення. Консультант Проекту сприяння академічній доброчесності в Україні SAIUP Є. Стадний слушно зазначає, що «створенню етичного кодексу повинно передувати дослідження рівня академічної доброчесності, а можливо, загалом рівня поширеності етичних принципів, серед академічної спільноти» [16, с. 6]. Для цього, на його думку, доцільним буде проведення анонімного опитування учасників освітнього процесу. Саме таким методом дослідження ми керувалися для реалізації мети нашого дослідження.

З метою з'ясування рівня дотримання академічної доброчесності під час реалізації освітнього процесу в 2022-2023 н. р. в Дунайському інституті водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій було проведено анонімне опитування здобувачів вищої освіти шляхом застосування електронних анкет. В опитування взяли участь 411 респондентів, які поділилися своїми відповідями на наступні питання.

На запитання «Як, в цілому, Ви оцінюєте свою старанність у навчанні?» 93,9% респондентів відповіли «навчаюся з повною віддачею сил», 6,1% опитаних навчаються старанно лише час від часу.

На запитання «Чи відомо Вам, що таке академічна доброчесність?» 99,5% респондентів надали відповідь «так», 0,5% надали відповідь «ні».

На запитання «Наскільки Ви погоджуєтеся з наступними твердженнями?»

- в ДІВТ ДУІТ я отримую якісну освіту;
- я задоволений освітньою програмою, за якою навчаюсь;
- загалом здобувачі освіти, з якими я навчаюсь, дотримуються правил академічної доброчесності;
- я повністю проінформований про принципи академічної доброчесності».

Відповіді респондентів можна узагальнити таким чином: 100% опитаних повністю погодилися з тим, що вони повністю поінформовані про принципи академічної доброчесності. В ставленні до інших тверджень переважна більшість здобувачів (до першого твердження – 410 здобувачів, до другого – 410 здобувачів, до третього – 409 здобувачів) надала відповіді «повністю погоджуюся» і «радіше погоджуюсь».

Відповіді на наступне питання дозволили з'ясувати, як часто впродовж семестру здобувачі обговорювали з викладачами наступні питання. Так, за частотністю обговорення питання розподілились таким чином – «часто» обговорювались питання про правила цитування запозичених текстів та правила посилання на використану літературу (399 опитаних), плагіат, списування та інші порушення (397 опитаних), етика та/ або академічна доброчесність та санкції за плагіат (по 395 опитаних).

На запитання «Чи маєте Ви доступ до силабусів (тематичних планів курсів)?» 98,1% респондентів надали позитивні відповіді, а 1,9% – що мають доступ до силабусів більшості освітніх компонентів.

Зрозумілість критеріїв оцінювання письмових робіт з освітніх компонентів 92,7% респондентів оцінили на «5» за п'ятибальною шкалою, 6,3% – на «4».

Відповідь на питання щодо оцінювання результатів навчання з боку викладачів засвідчила повну відсутність (100%) випадків необ'єктивного оцінювання результатів навчання з боку викладачів. Зазвичай у 99,8% випадків викладачі надають повну інформацію здобувачам, докладно роз'яснюючи вимоги та критерії оцінювання курсових робіт та інших видів письмових науково-дослідних завдань.

На запитання «Чи доводилося Вам писати однакові роботи для різних дисциплін?» 99,5% респондентів відповіли «ні», 0,5% опитаних було важко надати відповідь.

Переважна більшість опитаних вважає, що роботи здобувачів (98%) та роботи науково-педагогічних працівників (100%) доцільно перевіряти на плагіат.

Опитуваним було запропоновано визначити, які заходи стосовно здобувачів освіти у випадку виявлення і доведення плагіату у їх академічних текстах вони вважають справедливими. Відповіді розподілились так: незарахування роботи (95,6%); призначення додаткових завдань (9,5%); зниження оцінки (35,5%); оголошення догани (50,4%); недопущення до складання екзамену/заліку (56%); публічне соромлення, виховна бесіда (16,8%). Жоден опитуваний не обрав варіант «відрахування з університету».

Щодо санкцій відносно викладачів у разі виявлення і доведення плагіату у їх академічних текстах (дисертації, монографії, підручники тощо) респонденти вважають справедливими такі: оголошення догани (86,4%); публічне соромлення, виховна бесіда (12,4%); розгляд на Вченій Раді інституту (25,3%); звільнення з інституту (3,6%); позбавлення наукових ступенів/вчених звань (37%).

Переважна більшість опитаних здобувачів позитивно оцінила рівень володіння запропонованими для оцінювання знаннями/навичками, пов'язаними із дотриманням принципів академічної доброчесності. Так 390 здобувачів знають та вміють застосовувати на практиці основні системи для перевірки текстів на ознаки плагіату, 18 – знають, але не вміють застосовувати їх на практиці. 411 здобувачів знають та вміють застосовувати на практиці методи інформаційного пошуку, а 403 здобувачі знають та вміють застосовувати на практиці способи поширення результатів дослідження у відкритому доступі. 395 здобувачів знають правила оформлення посилань і цитувань в наукових роботах та вміють застосовувати їх на практиці, а 10 – знають, але не вміють застосовувати їх на практиці.

Відповіді респондентів на наступне питання підтвердили відсутність конфліктних ситуацій в освітньому процесі. Так відсутність конфліктів з викладачами та з представниками адміністрації інституту підтвердили 100% здобувачів. 100% респондентів заперечили наявність в інституті з боку інших осіб щодо них таких проявів поведінки, як дискримінаційні висловлювання, утиски, дії сексуального характеру, виражені словесно або фізично.

Отже, анонімні відповіді здобувачів Дунайського інституту водного транспорту на питання щодо дотримання академічної доброчесності в освітньому процесі є об'єктивною підставою для висновування розуміння здобувачами академічної доброчесності як невід'ємної складової забезпечення якості вищої освіти й однієї з умов ґрунтовної професійної підготовки майбутніх фахівців морської галузі.

Висновки. Ретельний аналіз результатів проведеного опитування здобувачів вищої освіти ДІВТ ДУІТ та цілком достатня кількість респондентів дають надійні підстави для наступних

висновків. Респонденти мають достатньо високий рівень інформованості щодо дотримання академічної доброчесності та всіх можливих наслідків з питань виявлення академічного плагіату, що, безперечно, надасть їм можливість для досягнення такого результату навчання, як «знання особливостей організації та функціонування сучасної системи вищої освіти, норм академічної культури, принципів політики академічної доброчесності; уміння застосовувати навички якісного академічного письма» [6].

Під час розгляду та обговорення результатів опитування на засіданнях випускової кафедри та Вченої ради ДІВТ ДУІТ було зауважено, що академічна доброчесність як складова системи якості освітнього процесу в Дунайському інституті водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій не залишається лише у площині теоретичних обговорень та потребує аналізу конкретних випадків порушення «академічної етики». Саме відкрите та доброчесне ставлення до поодиноких випадків порушення академічної доброчесності потребує продовження проведення заходів для попередження академічної недоброчесності та інших можливих перешкод на шляху побудови безпечного та доброчесного освітнього середовища. Отримані висновки будуть враховані при визначенні особливостей організації та покращення якості освітнього процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Курбатов С. Академічна доброчесність як імператив виживання університетської спільноти. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Історичне релігієзнавство»*. 2018. Вип. 19. С. 3–7. URL: <https://studyinukraine.gov.ua/wp-content/uploads/2018/03/Kurbatov.pdf> (дата звернення: 10.02.2023).
2. Академічна чесність як основа сталого розвитку університету / за заг. ред. Т. В. Фінікова, А. Є. Артюхова. Київ : Таксон, 2016. 234 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/0ByePGdGpHh6Wa1NoR3g4S1FaWVE/view?resourcekey=0-D5WaGeC3Qk1xJQURTJhtcw> (дата звернення: 10.02.2023).
3. Бралатан В. П., Гуцаленко Л. В., Здирко Н. Г. Професійна етика : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2011. 252 с. URL: http://elcat.pnpu.edu.ua/docs/Prof_etika.pdf (дата звернення: 10.02.2023).
4. Зозуля К. В. Академічна доброчесність як інструмент підвищення престижу вищої освіти. *Академічна доброчесність: виклики сучасності* : зб. наук. есе учасників дистанц. етапу наук. стажування для освітян, Варшава, 11 – 23 берез. 2019 р. Варшава, 2019. С. 84–87. URL: <https://dspace.hnpu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b36c7864-f534-463b-8415-9d9ff5dc0a84/content> (дата звернення: 10.02.2023).
5. Лист МОН щодо впровадження Європейської хартії дослідників та Кодексу працевлаштування наукових працівників від 19.11.2015. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/nauka/reforma-nauky/sndta94c.pdf> (дата звернення: 10.02.2023).
6. Освітньо-професійні програми ДІВТ ДУІТ. URL: <https://dfmrt.duit.edu.ua/education/education-programs/> (дата звернення: 10.02.2023).
7. Пак І. В. Академічна культура: деякі аспекти соціологічної інтерпретації. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Соціологічні дослідження сучасного суспільства: методологія, теорія, методи»*. 2017. Вип. 39. С. 323–327. URL: <https://periodicals.karazin.ua/ssms/article/download/10275/9793> (дата звернення: 10.02.2023).
8. Пак І. В. Академічна культура українського студентства: фактори формування та особливості прояву : дис. ... канд. соціол. наук : 22.00.04. Харків, 2019. 251 с. URL: https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/30718/1/Пак_дис_академічна%20культура_2019.pdf (дата звернення: 10.02.2023).
9. Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у ДУІТ. URL: https://files.duit.edu.ua/uploads/Сайт/11_ПУБЛІЧНА_ІНФОРМАЦІЯ/ПОЛОЖЕННЯ_ДУІТ/31_Положення-про-систему--забезпечення-АД-в-ДУІТ.pdf (дата звернення: 10.02.2023).

10. Про освіту : Закон України від 05.09.2017 р. № 2145-VIII : станом на 4 січ. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text> (дата звернення: 10.02.2024).
11. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII : станом на 27 груд. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text> (дата звернення: 10.02.2024).
12. Проект сприяння академічної доброчесності в Україні (SAIUP). URL: <https://academiq.org.ua/pro-proekt/proekt-v-universytetah/> (дата звернення: 10.02.2023).
13. Рекомендації для ЗВО щодо розробки й упровадження університетської системи забезпечення академічної доброчесності : рішення НАЗЯВО від 29.10.2019 р. No 11 (протокол No 11). URL: <https://naqa.gov.ua/2019> (дата звернення: 10.02.2023).
14. Сацик В. Академічна доброчесність: міфічна концепція чи дієвий інструмент забезпечення якості вищої освіти? URL: <http://education-ua.org.ua/articles/930-akademichna-dobrochesnist-mifichna-kontseptsiya-chi-dievij-instrument-zabezpechennya-yakosti-vishchoji-osviti> (дата звернення: 10.02.2023).
15. Сопова Д. Академічна доброчесність у системі професійної підготовки майбутнього педагога. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика. Серія: Педагогічні науки*. 2018. No 3-4 (56-57). С. 52–56. URL: https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/26113/1/D_Sopova_ADSPPMP_NPOTR_UK.pdf (дата звернення: 10.02.2023).
16. Стадний Є. Деякі рекомендації щодо впровадження етичних кодексів в українських вищих навчальних закладах. 2017. 18 с. URL: <https://repository.ldufk.edu.ua> (дата звернення: 10.02.2023).
17. Шапунова К. Формування академічної доброчесності майбутніх учителів початкової школи у процесі професійної підготовки до педагогічної практики: сутність і специфіка. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2020. No 10 (104). С. 301–314. URL: <https://pedscience.sspu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/07/102020.pdf> (дата звернення: 10.02.2023).
18. Що потрібно знати про плагіат: посібник з академічної грамотності та етики для «чайників» / уклад. О. О. Гужва. Харків : Харків. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна, Ін-т соціально-гуманітар. дослідж., 2016. 72 с. URL: https://library.kubg.edu.ua/images/stories/Departaments/biblio/PDF/books_ac-gr.pdf (дата звернення: 10.02.2023).
19. Ячменик М. Академічна доброчесність – основа якості освіти: досвід Сумського педагогічного університету імені А. С. Макаренка. *Академічна культура дослідника в освітньому просторі: європейський та національний досвід* : зб. матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф., м. Суми, 14-15 трав. 2020 р. Суми, 2020. С. 12–15. URL: https://jmm.sspu.edu.ua/images/2020/konf_5/Zbirnik_ACR_31_07_20_ba8f6.pdf (дата звернення: 10.02.2023).

REFERENCES

1. Kurbatov, S. (2018). Akademichna dobrochesnist' yak imperativ vyzhyvannya universytets'koyi spil'noty [Academic integrity as an imperative for the survival of the university community]. *Naukovi zapysky Natsional'noho universytetu «Ostroz'ka akademiya»*. Seriya Istorychne relihiyevnavstvo, 19, 3–7. <https://studyinukraine.gov.ua/wp-content/uploads/2018/03/Kurbatov.pdf> (in Ukrainian)
2. Finkova, T. V. (Ed.) & Artyukhova, A. Ye. (Ed.). (2016). Akademichna chesnist' yak osnova staloho rozvytku universytetu [Academic honesty as the basis for sustainable development of the university]. Kyiv: Takson. <https://drive.google.com/file/d/0ByePGdGpHh6Wa1NoR3g4S1FaWVE/view?resourcekey=0-D5WaGeC3Qk1xJQURTJhtcw> (in Ukrainian)
3. Bralatan, V. P., Hutsalenko, L. V., & Zdyrko, N. H. (2011). Profesiyna etyka [Professional ethics]. *Tsentr uchbovoyi literatury*. http://elcat.pnpu.edu.ua/docs/Prof_etika.pdf (in Ukrainian)
4. Zozulia, K. V. (2019). Akademichna dobrochesnist' yak instrument pidvyshchennya prestyžu vyshchoyi osvity [Academic integrity as a tool to enhance the prestige of higher education]. *Akademichna dobrochesnist': vyklyky suchasnosti* (pp. 84-87). Varsava.

<https://dspace.hnpu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b36c7864-f534-463b-8415-9d9ff5dc0a84/content> (in Ukrainian)

5. Ministry of Education and Science of Ukraine. (2015, November 19). Lyst MON shchodo vprovadzhennya Yevropeys'koyi khartiyyi doslidnykiv ta Kodeksu pratsevlashtuvannya naukovykh pratsivnykiv [Letter from the Ministry of Education and Science on the implementation of the European Charter for Researchers and the Code of Conduct for the Recruitment of Researchers]. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/nauka/reforma-nauky/sndta94c.pdf> (in Ukrainian)
6. Danube Institute of Water Transpor. (n.d.). *Osvitn'o-profesiyni prohramy DIVT DUIT* [Educational and professional programs of DIWT]. <https://dfmrt.duit.edu.ua/education/education-programs/> (in Ukrainian)
7. Pak, I. V. (2017). Akademichna kul'tura: deyaki aspekty sotsiologichnoyi interpretatsiyi [Academic culture: Some aspects of sociological interpretation]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya "Sotsiologichni doslidzhennya suchasnoho suspil'stva: metodolohiya, teoriya, metody"*, 39, 323-327. <https://periodicals.karazin.ua/ssms/article/download/10275/9793> (in Ukrainian)
8. Pak, I. V. (2019). *Akademichna kul'tura ukrayins'koho studentstva: faktory formuvannya ta osoblyvosti proyavu* [Academic culture of Ukrainian students: Factors of formation and peculiarities of manifestation] [Doctoral dissertation, V. N. Karazin Kharkiv National University]. https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/30718/1/Пак_дис_академічна%20культура_2019.pdf (in Ukrainian)
9. State University of Infrastructure and Technologies. (n.d.). *Polozhennya pro systemu zabezpechennya akademichnoyi dobrochesnosti u DUIT* [Regulations on the system of ensuring academic integrity at SUIT]. https://files.duit.edu.ua/uploads/Сайт/11_ПУБЛІЧНА_ІНФОРМАЦІЯ/ПОЛОЖЕННЯ_ДУІТ/31_Положення-про-систему--забезпечення-АД-в-ДУІТ.pdf (in Ukrainian)
10. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). *Pro osvitu* [On education] (Law No. 2145-VIII). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text> (in Ukrainian)
11. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). *Pro vyshchu osvitu* [On higher education] (Law No. 1556-VII). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text> (in Ukrainian)
12. *Proekt spryyannya akademichnoyi dobrochesnosti v Ukrayini* (SAIUP) [Project for enhancing academic integrity in Ukraine (SAIUP)]. <https://academiq.org.ua/pro-proekt/proekt-v-universytetah/> (in Ukrainian)
13. National Agency for Higher Education Quality Assurance. (2019). *Rekomendatsiyi dlya ZVO shchodo rozrobky y vprovadzhennya universytets'koyi systemy zabezpechennya akademichnoyi dobrochesnosti* [Recommendations for higher education institutions on the development and implementation of a university system for ensuring academic integrity] (Decision No. 11). <https://naqa.gov.ua/2019> (in Ukrainian)
14. Satsyk, V. (n.d.). *Akademichna dobrochesnist': mifichna kontseptsiya chy diyevyy instrument zabezpechennya yakosti vyshchoyi osvity?* [Academic integrity: A mythical concept or an effective tool for ensuring the quality of higher education?]. <http://education-ua.org.ua/articles/930-akademichnadobrochesnist-mifichna-kontseptsiyachi-dievij-instrument-zabezpechennyayakosti-vishchoji-osviti> (in Ukrainian)
15. Sopova, D. (2018). Akademichna dobrochesnist' u systemi profesiynoyi pidhotovky maybutn'oho pedahoha [Academic integrity in the system of professional training of the future teacher]. *Neperervna profesiyna osvita: teoriya i praktyka. Seriya: Pedahohichni nauky*, 3-4(56-57), 52-56. https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/26113/1/D_Sopova_ADSPPMP_NPOTP_UK.pdf (in Ukrainian)
16. Stadnyy, Ye. (2017). *Deyaki rekomendatsiyi shchodo vprovadzhennya etychnykh kodeksiv v ukrayins'kykh vyshchykh navchal'nykh zakladakh* [Some recommendations for the introduction of ethical codes in Ukrainian higher education institutions]. https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/29467/1/Деякі_рекомендації_щодо%20впровадження%20етичних%20кодексів%20%281%29.pdf (in Ukrainian)

17. Shamunova, K. (2020). Formuvannya akademichnoyi dobrochesnosti maybutnikh uchyteliv pochatkovoyi shkoly u protsesi profesiynoyi pidhotovky do pedahohichnoyi praktyky: sutnist' i spetsyfika [Formation of academic integrity of future primary school teachers in the process of professional training for pedagogical practice: Essence and specifics]. *Pedahohichni nauky: teoriya, istoriya, innovatsiyni tekhnolohiyi*, 10(104), 301-314. <https://pedscience.sspu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/07/102020.pdf> (in Ukrainian)
18. Huzhva, O. O. (Comp.). (2016). *Shcho potribno znaty pro plahiat: Posibnyk z akademichnoyi hramotnosti ta etyky dlya "chaynykiv"* [What you need to know about plagiarism: A guide to academic literacy and ethics for "dummies"]. V. N. Karazin Kharkiv National University. https://library.kubg.edu.ua/images/stories/Departaments/biblio/PDF/books_ac-gr.pdf (in Ukrainian)
19. Yachemenyk, M. (2020). Akademichna dobrochesnist' – osnova yakosti osvity: dosvid Sums'koho pedahohichnoho universytetu imeni A. S. Makarenka [Academic integrity is the basis of quality education: The experience of Sumy Pedagogical University named after A.S. Makarenko]. In O. M. Semenoh (Ed.), *Akademichna kul'tura doslidnyka v osvith'omu prostori: yevropeys'kyi ta natsional'nyy dosvid* (pp. 12–15). Sumy. https://jmm.sspu.edu.ua/images/2020/konf_5/Zbirnik_ACR_31_07_20_ba8f6.pdf (in Ukrainian)

Medvedieva O.Iu., Stroienko N.H., Katrych A.V., Shvaika M.O.

INSTILLING A CULTURE OF ACADEMIC INTEGRITY IN FUTURE WATER TRANSPORT PROFESSIONALS

In today's world, where water transport plays a key role in international trade, logistics and economic development, the relevance of studying and implementing a culture of academic integrity among future water transport professionals is becoming indispensable. In order to ensure the efficient functioning of water transport, preserve its reputation and strengthen its international competitiveness, it is important not only to provide students with professional skills but also to develop higher ethical standards.

The article outlines the peculiarities of the formation of academic integrity of future water transport specialists as one of the determining conditions for the professional training of higher education students within the educational process. The Danube Institute of Water Transport of State University of Infrastructure and Technologies, which trains future water transport specialists in the educational and professional programs 271.01 «Navigation and Ship Handling», 271.02 «Operation of Ship Technical Systems and Complexes» and 271.03 «Ship Electrical Plant Operation and Means of Automation» pays considerable attention to instilling and observing the rules and principles of academic integrity in the educational process and is guided in this vector of its activities by the Regulation on the system of ensuring academic integrity in State University of Infrastructure and Technologies [9]. The implementation of the principles of academic integrity means that all participants in the educational process must adhere, first of all, to the principles of honest, responsible work and study.

We have analyzed the legislative and scientific sources regarding the content of the concept of "academic integrity". Having analyzed the results of an anonymous survey of higher education students of the Danube Institute of Water Transport, specialty 271 Maritime and Inland Water Transport, and having studied the educational and methodological literature, we have outlined a list of knowledge and skills in academic integrity that a future water transport specialist should master in the process of preparing for professional practice.

The current state of development of water transport, which is currently the leader in terms of cargo transportation and provides the lowest cost, actualizes the importance of ethics and academic integrity in the training of future specialists in this field. The problems and challenges associated with the insufficient level of academic integrity culture serve as an important introduction to the study designed to address these negative trends and ensure the stable development of the industry.

Keywords: *academic integrity, future water transport specialists, professional training, higher education institution, specialty, educational and professional program, higher education student, code of ethics; moral and ethical behavior; manifestations of academic dishonesty; plagiarism.*

УДК 378.034:271.222:616.12

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.26

Медведєва О.Ю., Стросько Н.Г., Катрич А.В.

РОЗВИТОК МОВЛЕННЄВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ МОРЯКІВ ПІД ЧАС ПОЗААУДИТОРНОЇ РОБОТИ

На сучасному етапі конкурентоспроможність випускників українських вишів на внутрішньому і міжнародному ринку праці стає дедалі актуальнішою і відтак посилює свій вплив на визначення пріоритетних напрямків освітнього процесу. В умовах реформування вищої освіти в Україні відповідно до вимог Болонського процесу частка самостійної роботи студентів значно зростає. Тому постає питання ефективної організації позааудиторної роботи, зокрема для розвитку професійних компетентностей майбутніх фахівців. «Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 роки» є документом, схваленим Кабінетом Міністрів України, який чітко визначає мету вищої освіти в Україні – «інтелектуальний, культурний і професійний розвиток особистості» [24, с.19]. У зв'язку з цим МОН України окреслює цілком очікуваний результат реалізації «Стратегії» як «створення сучасної ефективної системи вищої освіти, яка задовольняє потреби громадян, економіки та суспільства, має гідну репутацію та є конкурентоспроможною на внутрішньому та світовому ринку освітніх послуг» [17]. Створення ефективної системи вищої освіти є нагальною потребою підготовки кваліфікованих фахівців абсолютно всіх без винятку галузей, в тому числі і морської. «Заклади вищої морської освіти повинні забезпечувати здобувачів освіти добре спланованою та цілеспрямованою підготовкою, націленою на розвиток особистих якостей та професійних навичок» [13, с. 105]. З приємністю зазначу, що багато моїх колег, які прищеплюють культуру мовленнєвої комунікації здобувачам вищої освіти морської галузі, вказують на практичну значущість «аналізу стану сформованості комунікативних навичок у цієї категорії здобувачів освіти» [16, с. 217].

Отже, рівень оволодіння випускником вишу морської галузі комунікативними компетентностями є важливим індикатором його фахової компетентності і відтак цілком обґрунтовує актуальність нашої наукової розвідки.

Ключові слова: здобувач вищої освіти, компетентність, професійна компетентність, мовленнєва компетентність, професійна мовленнєва компетентність майбутніх моряків, позааудиторна робота, науковий гурток, тематичний тиждень.

Постановка проблеми. В умовах приєднання України до Болонського процесу в освітньому процесі у вищій школі значно зменшується кількість аудиторних годин, відведених на опанування освітніх компонентів, і, відповідно, зростає обсяг самостійної роботи здобувачів. Тому одним із шляхів реальної імплементації європейських стандартів освіти в український освітній простір Ю. Притика (з чим здебільшого погоджується й автор статті) вважає «збільшення самостійної позааудиторної роботи здобувачів з відповідним контролем викладачем» [20]. Отже, покликанням чітко організованої позааудиторної самостійної роботи здобувачів має стати підвищення ефективності професійної теоретичної і практичної підготовки майбутніх фахівців.

Для реалізації мети нашої статті необхідно чітко визначитися з сутністю ключових дефініцій порушеної проблеми. Так, переважна більшість науковців, які досліджують зміст поняття «позааудиторна робота», має спільну позицію щодо його трактування. З усіх трактувань цього поняття, з якими ми ознайомилися в процесі дослідження, нам найбільше імпонує думка Т. Плачинди, яка розуміє позааудиторну роботу як «один із головних чинників формування самостійності здобувачів, в якому закріплюється їх потреба у професійному самовихованні, самореалізації і, що особливо важливо, їхня діяльність усе більше набуває творчого характеру [18, с. 120-121]. У векторі продовження міркувань Т.Плачинди щодо планування позааудиторної роботи зі здобувачами, аби вона була результативною, вельми слушно зауважує В. Коваль: – «В першу чергу, ми повинні зрозуміти, що позааудиторна діяльність у ВНЗ будується не для студентів, а зі студентами з урахуванням їх інтересів та можливостей» [8].

В трактуванні дефініції «мовленнєва компетентність» ми поділяємо думку М. Пентилюк, яка розуміє цей вид компетентності як «діяльність людини, спрямовану на розуміння або створення тексту (усного або писемного), що здійснюється в процесі мовленнєвої діяльності» [22]. На черзі дотичним буде висновування Н. Скибун, у якої не викликає заперечень твердження щодо «обовязкової сформованості мовленнєвої компетентності для фахівців таких галузей діяльності, які повністю пронизані складною системою комунікації» [21, с. 77]. Останнє висновування може бути повною мірою застосовано і для майбутніх фахівців морської галузі, яка «є однією з найбільш динамічних та перспективних галузей міжнародного господарства» [9, с. 241].

Дослідники позааудиторної роботи у виші поділяють її на дві категорії – «професійно спрямовану і соціально спрямовану» [2]. Об'єктом нашої уваги ми обрали саме професійно спрямовану позааудиторну роботу, яка реалізується шляхом участі здобувачів у роботі наукових гуртків. Вмотивованість нашого вибору цього вектору позааудиторної роботи ми аргументуємо тим, що, на думку дослідників Л. Бровко та О. Стеценко, саме «така діяльність носить фаховий характер, об'єднує студентів подібних спеціальностей, проходить під керівництвом або наглядом викладача-куратора та вимагає від студентів чималих зусиль, послідовності, цілеспрямованості та вмотивованості» [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи джерельну базу дослідження, ми засвідчилися, що обраній для розгляду проблемі якісного оволодіння мовленнєвими компетентностями майбутніми моряками під час позааудиторних заходів присвячено чимало актуальних розвідок у наукових доробках українських та зарубіжних учених. Особливо цінними для реалізації мети дослідження були праці вчених, присвячені вузьким аспектам дослідження фахової підготовки моряків.

Так, увагою С. Камінської стала роль позанавчальної роботи як «додаткової підготовки студента до виконання своїх професійних обов'язків у майбутньому, подолання мовного бар'єру та соціалізація з членами екіпажу через комунікацію» та її можливості під час формування комунікативної культури майбутніх моряків [6, с. 55-56].

О. Мороз, враховуючи низку невідкладних потреб моряків, пропонує «визнати професійно-орієнтовану комунікативну компетенцію невід'ємним інтегральним складником професійної компетентності фахівця морської галузі, оскільки вона забезпечить можливість прийняття швидких і правильних рішень у складних професійних умовах, ґрунтуючись на інформації, отриманій в процесі спілкування з іншими представниками та учасниками морської галузі» [14, с. 39].

Л. Турлак разом зі співавторами О. Колмиковою [9] та Т. Константиною [11] присвячує свої розвідки аналізу комунікативної компетентності майбутніх спеціалістів морської галузі та їх мовленнєвої культури і вважає, «що знання державної та іноземної мов, володіння культурою мовлення значною мірою визначають рівень галузевого професіоналізму» [9, с.241]. Також вказані автори окреслюють наявні проблеми у комунікації моряків і рекомендують низку заходів, скерованих на їх уникнення [11].

Л. Ліпшиць присвятила свою аналітику різновекторним напрямкам підготовки висококваліфікованих конкурентоздатних фахівців морської галузі [12,13] і у висновках резюмувала, що комунікація моряків – це «величезний ресурс та інструмент для діяльності, порозуміння та співпраці» [13, с. 105].

Зважаючи на постійне збагачення і оновлення складу професійної лексики моряків, І. Нагрибельна здійснила аналіз засобів навчання цього шару лексики у підготовці майбутніх моряків на заняттях з української мови, акцентуючи при цьому на пропорційному використанні самостійної та аудиторної (комбінованої) освітньої діяльності [15, с. 62]. Заслугує бути зазначеним і той факт, що І. Нагрибельна адаптує своє дослідження до умов дистанційного навчання і вказує на посилення впливу електронних засобів на процес опанування професійною лексикою [15, с. 65]. В іншій статті авторка зосереджує увагу на не менш важливих за низку інших чинників, а саме – на соціальних, що актуалізували потребу формування комунікативної компетентності майбутніх моряків у сучасних здобувачів освіти [16, с. 216].

О. Тимофєєва зосередила увагу на аналізі іншомовної комунікативної компетентності в цілому, вивченні структури та особливостей формування лінгвістичної компетенції майбутніх фахівців морської галузі за допомогою інформаційних технологій та фактичних програм, якими користуються здобувачі, визначенні результативності таких технологій у формуванні комунікативної компетентності в цілому та наданні рекомендацій щодо розширення переліку таких програм [25, с. 127].

І. Тихонова та Т. Константинова дослідили засоби і стратегії діалогічного навчання, які стануть в нагоді майбутнім морякам в процесі оволодіння мовнопрофесійними компетентностями [26]. Ці ж авторки у наступній розвідці запропонували своє бачення застосування кейс-методу як інноваційної педагогічної технології у процесі формування навичок професійно-орієнтованого спілкування майбутніх моряків [10, с. 141].

Отже, огляд наукової літератури дозволяє констатувати «актуальність та поліфункціональність досліджуваної категорії» [16, с. 219].

Мета дослідження. Мета статті – проаналізувати форми та методи формування мовленнєвих компетентностей майбутніх фахівців морської галузі під час позааудиторної роботи. Для реалізації мети дослідження потрібно було розв'язати низку важливих завдань:

- проаналізувати трактування основних дефініцій порушеної проблеми;
- обґрунтувати необхідність формування комунікативної компетентності у майбутніх моряків;
- вивчити шляхи формування комунікативної компетентності у майбутніх моряків.

Основні результати дослідження. Аналіз інформації на сайтах вишів, які готують майбутніх фахівців морської галузі, засвідчив, що найбільш популярною і масовою формою позааудиторної роботи в них є робота наукових гуртків. Така ситуація є цілком закономірною, оскільки, згідно з визначенням дослідників Л. Бровко та О. Стеценко, «гурткова робота – це традиційна форма навчально-виховного процесу, яка при правильній організації дозволяє розкрити інтелектуальний та духовний потенціал молоді» [2].

Робота наукових гуртків і проблемних груп в Дунайському інституті водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій має свою цікаву історію і традиції. Наукові гуртки – одна з форм наукової діяльності здобувачів вищої освіти, спрямована на розширення їх наукового потенціалу й формування навичок науково-дослідної діяльності у позааудиторний час. Наукові гуртки здобувачів у Дунайському інституті водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій є добровільними некомерційними об'єднаннями здобувачів освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт, що займаються творчою роботою. Керуючись статусом безперечної пріоритетності англійської мови в морській галузі, науково-педагогічний склад кафедри соціально-гуманітарних дисциплін підтримав прагнення здобувачів до вдосконалення іншомовної комунікативної компетенції та на підставі спільності навчальних інтересів здобувачів створив при кафедрі наукові гуртки для розвитку мовленнєвих компетентностей майбутніх моряків. В

своїй діяльності наукові гуртки керуються Положенням про студентські наукові гуртки Державного університету інфраструктури та технологій [19].

Наразі в ДІВТ ДУІТ для здобувачів вищої освіти плідно працюють три гуртки, які на чолі з висококваліфікованими викладачами-керівниками прищеплюють майбутнім морякам іншомовні мовленнєві компетентності. Обов'язки наукових керівників регламентують роботу гуртків в наступних напрямках:

- виконання консультативно-дорадчих функцій;
- сприяння поширенню інформації про науковий гурток;
- відповідальність за планування і проведення засідань гуртка;
- проведення індивідуальних співбесід з гуртківцями з метою виявлення кола їх творчих інтересів і рівня підготовки;
- організація участі членів гуртка в науково-практичних конференціях здобувачів, засіданнях круглих столів та інших заходах;
- надання різноманітних завдань, пов'язаних з набуттям та вдосконаленням навичок та вмінь користування англійською інформацією з метою виконання творчих завдань.

Науковий гурток «BUSINESS ENGLISH» задля розвитку мовленнєвих компетентностей майбутніх фахівців морської галузі має основні завдання:

- забезпечення більш повного засвоєння навчального програмного матеріалу;
- розширення кругозору та поглиблення знань з освітнього компоненту «Ділова англійська мова»;
- стимулювання активної творчої праці здобувачів освіти у процесі навчання і оволодіння спеціальністю;
- виявлення серед них найбільш обдарованих;
- створення умов для їх творчого зростання.

Мета наукового гуртка – покращити основні чотири комунікативні вміння здобувачів освіти – слухати, розмовляти, читати та писати, на базі належних знань з граматики та широкої лексичної бази, включаючи технічну та морську лексику. Тематика засідань гуртка та методика їх проведення сприяють формуванню у здобувачів професійно-комунікативних компетентностей, що відповідають рівню B2 за європейською шкалою оцінки рівнів володіння англійською мовою. Тобто, міра володіння англійською мовою на цьому рівні повинна забезпечити усне та письмове мовлення у зв'язку з професійною діяльністю, спілкування з опонентами, вміння виступати на конференціях та вільно підтримувати професійні дискусії.

Основними формами роботи наукового гуртка є наступні:

- засідання наукового гуртка;
- участь у наукових семінарах, роботі круглих столів, конференцій та тижнів англійської мови;
- заслуховування доповідей здобувачів за запропонованими темами;
- обговорення рекомендованих до друку тез доповідей.

Основною метою проблемної групи English club – Клубу англійської мови є розвиток комунікативної, лінгво-країнознавчої та культурної іншомовної компетенції здобувачів освіти. Клуб ставить перед собою такі завдання:

- проведення тренінгів, майстер-класів та семінарів для навчання і розвитку здібностей здобувачів освіти на англійській мові;
- організаційна та консультативна допомога в самостійних наукових дослідженнях здобувачів освіти;
- залучення здобувачів освіти до участі в мистецьких заходах;
- розвиток інтересу до міжнародної комунікації на англійській мові;
- підвищення мотивації до вивчення англійської мови та самоосвіти в цілому;
- розширення світогляду та ерудиції здобувачів освіти;
- формування активної соціальної позиції.

В клубі обговорюються актуальні проблеми сьогодення, тому участь у засіданнях сприяє покращенню навичок критичного та аналітичного мислення здобувачів вищої освіти, надає досвід публічних виступів. Постійним гостем клубу є волонтер Корпусу миру з США Джен Саттон.

На окрему увагу заслуговує ще один осередок соціологічної, мультикультурної та наукової позааудиторної діяльності інституту, до якого залучені активні та креативні здобувачі вищої освіти – науковий гурток здобувачів вищої освіти «English club for navigators». Таке виокремлення цього гуртка з-поміж інших пов'язано з його вузькоспеціалізованою орієнтованістю – в його роботі беруть участь здобувачі спеціалізації 271.01 Навігація і управління морськими суднами. Мета гуртка – розвивати комунікативні навички володіння англійською мовою та спонукати майбутніх судноводіїв до дружньої співпраці, спілкування, поглибленого вивчення англійської мови професійного спрямування, науково-дослідницької, творчої діяльності, самоосвіти. Все це є вкрай важливим у вихованні моряків.

Безперечно, погоджуємося з думкою Є. Бондаренко, котра в результаті дослідження формування професійно-мовленнєвої компетентності майбутніх спеціалістів судноводіння у процесі фахової підготовки висновує наступне: – «Пріоритетність формування професійно-мовленнєвої компетентності майбутнього судноводія важко переоцінити, оскільки судноводій із сформованою професійно-мовленнєвою компетентністю здатний до високопродуктивної професійної діяльності в умовах жорсткої конкуренції на внутрішньому та зовнішньому ринках праці, підвищення якості організації роботи екіпажів та піклування про людей на судах, управління рухом суден, забезпечення безпеки судноплавства» [1, с. 1]. Дотично до теми нашої статті приємно відзначити, що у позааудиторній діяльності Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», на базі якого Є. Бондаренко проводила педагогічний експеримент з перевірки практичної значущості засобів формування професійно-мовленнєвої компетентності майбутніх судноводіїв, був організований розмовний клуб «Speaking Maritime English Club» (SMEC), який «передбачає вправи і завдання, спрямовані на розвиток діалогічного та монологічного мовлення, на вміння опрацьовувати автентичні професійно-орієнтовані матеріали: тексти, відео та аудіо» [1, с. 12].

Говорячи про розвиток мовленнєвих компетентностей майбутніх моряків під час позааудиторної роботи, жодною мірою не можна залишати поза увагою і підготовку з української мови [1, с. 1; 15, с. 62]. В цьому напрямку роботи в ДІВТ ДУІТ хотілося б акцентувати увагу на такій комплексній формі позааудиторної роботи у вищій школі як предметні тижні, які дослідники О. Дягілева та А. Юрженко вважають «однією із найяскравіших форм організації навчально-виховного процесу, де викладачі та студенти можуть проявити свої багатогранні здібності» [5, с. 36]. Так, вже традиційними в ДІВТ ДУІТ стали тижні української мови, які проводяться на початку листопада кожного навчального року з нагоди Дня української писемності та мови. Здобувачі I курсу денної форми навчання спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт з ентузіазмом і зацікавленням беруть участь у засіданні кают-компанії ДІВТ ДУІТ. Під час цього позааудиторного заходу здобувачі читають українською власні есе та вірші, поезії українських поетів, ділилися своїми думками і спостереженнями про історію і сучасність української мови, дають один одному корисні поради щодо переходу на спілкування українською мовою в побуті. Наслідком такого безпосереднього спілкування здобувачів і викладача у неформальній обстановці стала одностайна підтримка здобувачами необхідності популяризації української мови, яка дедалі відіграє важливу роль у консолідації українського суспільства.

Висновки. Проведений аналіз підтвердив, що позааудиторна робота у різних формах, зокрема наукові гуртки, дискусійні клуби, тематичні тижні, квести тощо, є надзвичайно дієвим і результативним інструментом для формування мовленнєвих компетентностей майбутніх фахівців морської галузі. На конкретних прикладах з практики Дунайського інституту водного транспорту було переконливо продемонстровано, як така позанавчальна діяльність сприяє ефективному розвитку комунікативних навичок здобувачів-моряків, особливо їхніх англійських компетентностей, що є надзвичайно важливим у цій професії у зв'язку зі

специфікою роботи в міжнародних екіпажах. Отже, можна стверджувати, що позааудиторна робота відіграє вкрай вагомий роль у формуванні загальної професійної компетентності та конкурентоспроможності майбутніх фахівців для морської галузі. Такі форми діяльності варто широко запроваджувати в практику підготовки кваліфікованих кадрів для морського флоту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бондаренко Є. В. Формування професійно-мовленнєвої компетентності майбутніх спеціалістів судноводіння у процесі фахової підготовки : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04. Херсон, 2018. 23 с.
2. Бровко Л. В., Стеценко О. О. Взаємозв'язок складових у системі позааудиторної та виховної роботи у ВНЗ I-II рівнів акредитації. *Наурук*. URL: <https://naurok.com.ua/stattya-vzaimozv-yazok-skladovih-u-sistemi-pozaauditorno-ta-vihovno-roboti-u-vnz-i-ii-rivniv-akreditaci-31591.html> (дата звернення: 25.02.2023).
3. Децюк Т. М., Дударенко А. А. Форми та методи позааудиторної роботи студентів у вищих навчальних закладах. *Молодий вчений*. 2018. № 3 (55). С. 80–83.
4. Дягилева О. С., Юрженко А. Ю. Електронний курс «english week 2018-2019» для організації позааудиторної роботи з англійської мови майбутніх суднових механіків. *Іноземні мови*. 2019. № 3. С. 34–42.
5. Камінська С. Структура позанавчальної роботи – складова формування іншомовної комунікації майбутнього моряка. *Наука і освіта*. 2021. № 4. С. 55–62.
6. Коваль В. Ю. Система позааудиторної діяльності студентів вищих навчальних закладів. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: педагогіка, психологія і соціологія*. 2009. Вип. 6. С. 19–23.
7. Колмикова О. О., Турлак Л. П. Комунікативна компетентність як необхідна вимога реалізації професійної діяльності фахівців морської галузі. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2021. Вип. 30. С. 241–251.
8. Константинова Т. М., Тихонова І. Ю. Підготовка фахівців морської галузі до іншомовного професійно орієнтованого спілкування засобами кейс-методу. *Наукові записки Міжнародного гуманітарного університету*. 2019. Вип. 31. С. 141–144.
9. Константинова Т. М., Турлак Л. П. Формування мовленнєвої культури майбутніх фахівців морської галузі у процесі професійної підготовки. *Наукові записки Міжнародного гуманітарного університету*. 2019. Вип. 31. С. 144–148.
10. Ліпшиць Л. В. Толерантність як ціннісна складова професійної компетентності майбутніх фахівців морської галузі. *Педагогічний альманах*. 2020. Вип. 46. С. 163–169.
11. Ліпшиць Л. В. Розвиток м'яких навичок як засобу ефективного спілкування моряків. *Педагогічний альманах*. 2022. Вип. 51. С. 101–105.
12. Мороз О. Л. Роль і місце професійно-орієнтованої комунікативної компетенції в системі професійної підготовки майбутніх фахівців морської галузі. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2020. Вип. 31, т. 4. С. 39–44.
13. Нагрибельна І. А. Засоби навчання професійної лексики у підготовці майбутніх фахівців морської галузі на заняттях з української мови. *Педагогічні науки*. 2023. Вип. 101. С. 62–66.
14. Нагрибельна І. А. Методика формування комунікативної компетентності майбутніх фахівців морської галузі в системі вищої освіти. *Педагогічні науки*. 2020. Вип. 34, т. 4. С. 216–221.
15. Офіційна сторінка МОН України. Опубліковано Стратегію розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 роки. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/opublikovano-strategiyu-rozvitku-vishoyi-osviti-v-ukrayini-na-2022-2032-roki> (дата звернення: 25.02.2023).
16. Плачинда Т. С. Вища школа та науково-педагогічна діяльність : курс лекцій. Кропивницький : ЛА НАУ, 2021. 188 с.

17. Положення про студентські наукові гуртки Державного університету інфраструктури та технологій. URL: <https://files.duit.edu.ua/uploads> (дата звернення: 25.02.2023).
18. Притика Ю. Проблеми впровадження стандартів Болонського процесу. Legalweekly. URL: <http://legalweekly.com.ua/index.php?id=16061&show=news&newsid=121257> (дата звернення: 25.02.2023).
19. Скибун Н. Д. Професійна мовленнєва компетентність як наукове поняття. *Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology*. 2015. Вип. 37, No 75. С. 76–79.
20. Словник-довідник з української лінгводидактики : навч. посіб. / М. Пентиліук та ін. ; за заг. ред. М. Пентиліук. Київ : Ленвіт, 2015. 319 с.
21. Смалько О. Позааудиторна виховна робота як чинник професійно-особистісного становлення майбутніх фахівців. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: Педагогічні науки*. 2014. No 8. С. 77–80.
22. СТРАТЕГІЯ розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 роки. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-rozvitku-vishchoyi-osviti-v-ukrayini-na-20222032-roki-286-> (дата звернення: 25.02.2023).
23. Тимофєєва О. Інформаційні технології як додатковий засіб формування лінгвістичної компетенції майбутніх фахівців морської галузі. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2023. Вип. 61, т. 4. С. 127–134.
24. Тихонова І. Ю., Константинова Т. М. Діалогічне мовлення як ключовий аспект у процесі навчання іноземної мови у професійній підготовці майбутніх фахівців морської галузі. *Інноваційна педагогіка*. 2019. Вип. 18, т. 2. С. 109–113.

REFERENCES

1. Bondarenko, Ye. V. (2018). Formuvannia profesiino-movlennievoi kompetentnosti maibutnikh spetsialistiv sudnovodinnia u protsesi fakhovoi pidhotovky [Formation of professional and speech competence of future navigation specialists in the process of professional training] (Extended abstract of candidate's thesis). Kherson. (in Ukrainian)
2. Brovko, L. V., & Stetsenko, O. O. (n.d.). Vzaiemozviazok skladovykh u systemi pozaudytornoi ta vykhovnoi roboty u VNZ I-II rivniv akredytatsii [The relationship of components in the system of extracurricular and educational work in higher education institutions of I-II accreditation levels]. *Naurok*. <https://naurok.com.ua/stattya-vzaemozv-yazok-skladovih-u-sistemi-pozaudytornoi-ta-vihovno-roboty-u-vnz-i-ii-rivniv-akreditaci-31591.html>
3. Detsiuk, T. M., & Dudarenko, A. A. (2018). Formy ta metody pozaudytornoi roboty studentiv u vyshchykh navchalnykh zakladakh [Forms and methods of extracurricular work of students in higher educational institutions]. *Molodyi Vchenyi*, 3(55), 80–83. (in Ukrainian)
4. Diahileva, O. S., & Yurzenko, A. Yu. (2019). Elektronnyi kurs «English week 2018-2019» dlia orhanizatsii pozaudytornoi roboty z anhliiskoi movy maibutnikh sudnovykh mekhanikiv [The e-course «English week 2018-2019» for organization of extracurricular work on English of future ship mechanics]. *Inozemni Movy*, 3, 34–42. (in Ukrainian)
5. Kaminska, S. (2021). Struktura pozanavchalnoi roboty – skladova formuvannia inshomovnoi komunikatsii maibutnoho moriaka [The structure of extracurricular work is a component of the formation of foreign language communication of the future seafarer]. *Nauka i Osvita*, 4, 55–62. (in Ukrainian)
6. Koval, V. Yu. (2009). Systema pozaudytornoi diialnosti studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv [The system of extracurricular activities of university students]. *Naukovi Pratsi Donetskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Pedagogika, Psykholohiia i Sotsiologhiia*, 6(160), 19–23. (in Ukrainian)
7. Kolmykova, O. O., & Turlak, L. P. (2021). Komunikatyvna kompetentnist yak neobkhidna vymoha realizatsii profesiinoi diialnosti fakhivtsiv morskoi haluzi [Communicative competence as a necessary requirement for the implementation of professional activities of maritime specialists]. *Pedahohichna Osvita: Teoriia i Praktyka*, 30, 241–251. (in Ukrainian)

8. Konstantynova, T. M., & Tykhonova, I. Yu. (2019). Pidhotovka fakhivtsiv morskoi haluzi do inshomovnoho profesiino oriietovanoho spilkuvannia zasobamy keis-metodu [Preparation of maritime specialists for foreign language professionally oriented communication by means of case method]. *Naukovi Zapysky Mizhnarodnoho Humanitarnoho Universytetu*, 31, 141–144. (in Ukrainian)
9. Konstantynova, T. M., & Turlak, L. P. (2019). Formuvannia movlennievoi kultury maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi u protsesi profesiinoi pidhotovky [Formation of speech culture of future maritime specialists in the process of vocational training]. *Naukovi Zapysky Mizhnarodnoho Humanitarnoho Universytetu*, 31, 144–148. (in Ukrainian)
10. Lipshyts, L. V. (2020). Tolerantnist yak tsinnisna skladova profesiinoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi [Tolerance as a value component of the professional competence of future maritime professionals]. *Pedahohichnyi Almanakh*, 46, 163–169. (in Ukrainian)
11. Lipshyts, L. V. (2022). Rozvytok miakykh navychok yak zasobu efektyvnoho spilkuvannia moriakiv [Development of soft skills as a means of effective communication of seafarers]. *Pedahohichnyi Almanakh*, 51, 101–105. (in Ukrainian)
12. Moroz, O. L. (2020). Rol i mistse profesiino-oriietovanoi komunikativnoi kompetentsii v systemi profesiinoi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi [The role and place of professionally oriented communicative competence in the system of training future maritime professionals]. *Aktualni Pytannia Humanitarnykh Nauk*, 31(4), 39–44. (in Ukrainian)
13. Nahrybelna, I. A. (2023). Zasoby navchannia profesiinoi leksyky u pidhotovtsi maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi na zaniattiakh z ukrainskoi movy [Means of teaching professional vocabulary in training future maritime professionals in Ukrainian language classes]. *Pedahohichni Nauky*, 101, 62–66. (in Ukrainian)
14. Nahrybelna, I. A. (2020). Metodyka formuvannia komunikativnoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi v systemi vyshchoi osvity [Methods of forming the communicative competence of future maritime professionals in higher education]. *Pedahohichni Nauky*, 34(4), 216–221. (in Ukrainian)
15. Ministry of Education and Science of Ukraine. (n.d.). Opublikovano Stratehiiu rozvytku vyshchoi osvity v Ukraini na 2022-2032 roky [The strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022-2032 has been published]. <https://mon.gov.ua/ua/news/opublikovano-strategiyu-rozvitku-vishoyi-osviti-v-ukrayini-na-2022-2032-roki>
16. Plachynda, T. C. (2021). Vyshcha shkola ta naukovo-pedahohichna diialnist [Higher school and scientific and pedagogical activity]. LANAY. (in Ukrainian)
17. State University of Infrastructure and Technologies. (n.d.). Polozhennia pro studentski naukovy hurtky Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii [Regulations on student scientific circles of the State University of Infrastructure and Technologies]. https://files.duit.edu.ua/uploads/Sait/11_PUBLICHNA_INFORMATSIIA_POLOZHENNIA_DUIT/49-regulations-on-student-scientific-circles.pdf
18. Prytyka, Yu. (n.d.). Problemy vprovadzhennia standartiv Bolonskoho protsesu [Problems of implementing the standards of the Bologna process]. *Legalweekly*. <http://legalweekly.com.ua/index.php?id=16061&show=news&newsid=121257> (in Ukrainian)
19. Skybun, N. D. (2015). Profesiina movlennieva kompetentnist yak nauкове poniattia [Professional speech competence as a scientific concept]. *Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology*, 37(75), 76–79. (in Ukrainian)
20. Pentyljuk, M. (Ed.). (2015). Slovnyk-dovidnyk z ukrainskoi linhvodydaktyky [Dictionary-reference book on Ukrainian linguodidactics]. Lenvit. (in Ukrainian)
21. Smalko, O. (2014). Pozaaudytorna vykhovna robota yak chynnyk profesiino-osobystisnoho stanovlennia maibutnikh fakhivtsiv [Extracurricular educational work as a factor in the professional and personal formation of future specialists]. *Naukovyi Visnyk Skhidnoievropeiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Lesi Ukrainky. Serii: Pedahohichni Nauky*, 8(285), 77–80. (in Ukrainian)
22. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). Stratehiia rozvytku vyshchoi osvity v Ukraini na 2022-2032 roky [Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022-2032].

<https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-rozvitku-vishchoyi-osviti-v-ukrayini-na-20222032-roki-286->

23. Tymofeeva, O. (2023). Informatsiini tekhnolohii yak dodatkovyi zasib formuvannia linhvistychnoi kompetentsii maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi [Information technologies as an additional means of forming the linguistic competence of future maritime professionals]. *Aktualni Pytannia Humanitarnykh Nauk*, 61(4), 127–134. (in Ukrainian)
24. Tykhonova, I. Yu., & Konstantynova, T. M. (2019). Dialohichne movlennia yak kliuchovyi aspekt u protsesi navchannia inozemnoi movy u profesiinii pidhotovtsi maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi [Dialogic speech as a key aspect in the process of teaching a foreign language in the professional training of future maritime professionals]. *Innovatsiina Pedahohika*, 18(2), 109–113. (in Ukrainian)

Medvedieva O.Iu., Stroienko N.H., Katrych A.V.

DEVELOPMENT OF SPEAKING COMPETENCIES OF FUTURE SEAMEN DURING OUTSIDE WORK

At the current stage, the competitiveness of graduates of Ukrainian higher education institutions on the domestic and international labor market is becoming more and more relevant and thus increases its influence on determining the priority directions of the educational process. Under the conditions of reforming higher education in Ukraine in accordance with the requirements of the Bologna Process, the share of independent work by students has increased significantly. Therefore, there is a question of effective organization of extracurricular work, in particular for the development of professional competences of future specialists. «Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022-2032» is a document approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine, which clearly defines the purpose of higher education in Ukraine – «intellectual, cultural and professional development of the individual» [24, p.19]. In this regard, the Ministry of Education and Culture of Ukraine outlines the fully expected result of the implementation of the «Strategy» as «the creation of a modern and effective system of higher education that meets the needs of citizens, the economy and society, has a decent reputation and is competitive on the domestic and global market of educational services» [17]. The creation of an effective system of higher education is an urgent need for the training of qualified specialists in absolutely all branches, including maritime. «Institutions of higher maritime education should provide students with well-planned and purposeful training aimed at developing personal qualities and professional skills» [13, p. 105]. I am pleased to note that many of my colleagues, who instill the culture of speech communication in students of higher education in the maritime field, point to the practical significance of «analysis of the state of formation of communication skills in this category of students» [16, p. 217].

Therefore, the level of mastery of communicative competences by a graduate of a maritime higher education institution is an important indicator of his professional competence and therefore fully justifies the relevance of our scientific research.

Keywords: *student of higher education, competence, professional competence, speech competence, professional speech competence of future sailors, extracurricular work, scientific group, thematic week.*

Цюпа А.М., Матвійчук О.В.

ЗАРОДЖЕННЯ, РОЗВИТОК ТА ДОСЯГНЕННЯ РІЧКОВОГО СУДНОБУДУВАННЯ В УКРАЇНІ (1823-1963 РОКИ)

Стаття присвячена історії проектування, будівництва та експлуатації суден українського річкового флоту в період з 1823 до 1963 років, а також діяльності основних суднобудівельних підприємств України для забезпечення вантажних та пасажирських перевезень по річках нашої країни. У статті аналізується склад річкового флоту в залежності від умов плавання та звертається увага на необхідність будівництва суден для вантажних та пасажирських перевезень не тільки на середньому і нижньому Дніпрі, але також і на менших річках (наприклад Десні). У статті згадуються розроблені в Україні проекти суден, зокрема № 860 для роботи на Дніпрі та № 1867 з правом виходу у морські води, які не будувались у нашій країні, але після їх суттєвої модернізації могли б бути використані для будівництва сучасних пасажирських суден.

Ключові слова: Україна, суднобудування, Дніпро, малі річки, вантажний та пасажирський річковий флот.

Постановка проблеми та аналіз публікацій. При всій важливості історії техніки нашої країни сьогодні не існує видань, які б давали можливість ознайомитись з цими питаннями читачам, що цікавляться вказаною тематикою. Тому дуже важливим є вихід у світ колективної монографії «Історичні нариси з розвитку техніки в Україні» [1], виданої у 2023 році за загальною редакцією доктора технічних наук проф. Гріффена Л.О. У цьому виданні досить велику увагу приділено морському суднобудуванню, але, нажаль, відсутня інформація про проектування та будівництво річкових суден на українських заводах. Тому дана робота має **на меті** хоча б частково компенсувати цей недолік на прикладах діяльності основних суднобудівних підприємств України.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, головна річка нашої країни Дніпро є третьою за довжиною рікою Європи, по якій ще за часів Київської Русі проходив водний шлях «з варягів у греки», що мав дуже велике значення для розвитку як міжнародної, так і внутрішньої торгівлі, сприяв налагодженню різноманітних зв'язків окремих східнослов'янських племен та прискорення їх державного об'єднання навколо Києва. До середини ХІХ століття рух Дніпром відбувався переважно на плотах (в тому числі сплавлення лісу) та дерев'яних судах (здебільшого перевезення зерна).

Після винаходу парової машини відбулось різке зростання на території України виробництва річкових суден, яке здійснювалось у приватних майстернях. Перший дніпровський пароплав (рис.1), що мав назву «Бджілка», був збудований у 1823 році на річці Вільшанці (Черкащина) [2] у Мошенському маєтку графа М. Воронцова, чиє дитинство і юність пройшли у Лондоні, та здійснив свій перший рейс до міста Дніпро, після чого використовувався для буксирування барж. У 1835 році утворилась перша пароплавна компанія, два пароплави якої ходили Дніпром до 1846 року, буксируючи в основному баржі з камінням для будівництва Київської фортеці. У 1846 році по середньому Дніпру та Десні почали ходити пароплави Мальцева, а з 1857 року розпочався регулярний рух пароплавів по всій течії Дніпра як вище, так і нижче порогів. У 1860 р. Дніпром ходило 21 парове судно, а через 20 років їх було вже понад 60.

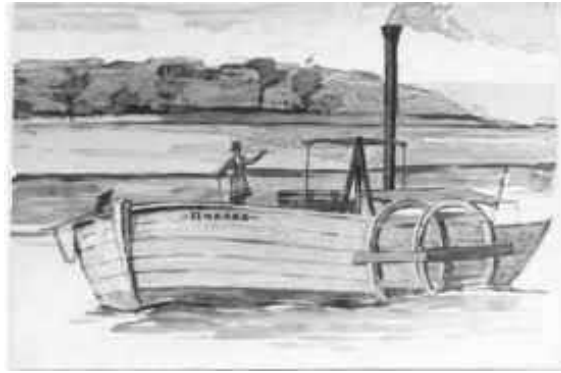


Рисунок 1 – Пароплав «Бджілка».

Зростанню кількості побудованих суден сприяло заснування заводів Доната у Києві (1862 р.), братів Вадонів у Херсоні (1853 р.), а також механічних майстерень у Києві (1896 р.), Запоріжжі (1913 р.) та інших придніпровських містах, які поступово переходили до будування річкових суден. Пізніше ці підприємства змінили назви: завод Доната на «Ленінську кузню», завод Вадонів на «Завод ім. Комінтерна», а Київські та Запорізькі майстерні стали суднобудівельно – судноремонтними заводами (КССРЗ та ЗССРЗ відповідно).

Значний внесок у розвиток річкового суднобудування зробив Київський завод Доната, який у перші роки після заснування виготовляв обладнання для млинів, цукрових заводів, Київського водопроводу та будівництва мостів, а також військово – інженерне обладнання для Київського арсеналу і фортечної артилерії та залізничні вагони. Але, після його розширення, завод до 1901 року освоїв виробництво 11 типів парових котлів різних систем, а через кілька років на замовлення пароплавств і транспортних фірм почав виготовляти судові парові котли та парові машини потужністю до 200 к.с., а також гребні колеса, гребні вали та сталеві стерна для пароплавів [3]. Самі пароплави будувались на невеликих приватних підприємствах. Лише у 1913 році завод почав за власним проектом будувати серію колісних буксирних пароплавів потужністю 250 к.с. з золотниковою машиною потрійного розширення, яка працювала на насиченій парі при тиску 12 атм. Пароплави мали сталевий корпус довжиною 50 м, шириною 7 м при висоті борту 2,23 м та найбільшу ширину з колесами 13,8 м.

У 1928 році на заводі було організоване судно-механічне конструкторське бюро для розробки проектів і робочих креслень суден та механізмів, а також започатковане будівництво корабельні, яка почала працювати вже навесні 1929 року [3]. З цього часу основною спеціалізацією заводу стало суднобудування.

У 1931 році на заводі «Ленінська кузня» («Л.К.») при консультації академіка Є.О. Патона був спроектований буксирний пароплав потужністю 150 к.с. з суцільнозварним корпусом, а з наступного року почався серійний випуск таких суден. Одночасно будувались також баржі для цих буксирувальників.

Крім цього завод продовжував будувати вже згадані буксирні пароплави потужністю 250 к.с., які у 1932 році були модернізовані внаслідок збільшення потужності силової установки до 300 к.с. за рахунок підвищення тиску пари до 14 атм. Одночасно на базі тих самих машинно-котельних установок були спроектовані та будувались одноповерхові і двоповерхові (так їх тоді називали) колісні пасажирські пароплави проектів СБ-7а, СБ-7б потужністю 250 к.с. (рис.2).



Рисунок 2. Пасажирський пароплав проєкту СБ – 76.

Слід відзначити, що значну увагу на заводі було приділено будівництву суден, призначених для роботи на мілководних річкових плесах з обмеженими габаритами суднового ходу, і першими такими суднами, збудованими на «Л.К.» починаючи з 1929 року, можна вважати буксирні пароплави проєкту СБ-20 потужністю 125 к.с. (довжина 43,4 м, ширина корпусу з колесами 11,5 м, висота борту 2,35 м), для яких були побудовані золотникові парові машини подвійного розширення, що працювали на насиченій парі при тиску 12 атм. Ці пароплави призначались для роботи з тентовими баржами вантажопідйомністю 250 т, які будувались на цьому ж заводі у 1929 – 1931 роках. Згідно з програмою модернізації річкового флоту у 1935 р. був запропонований реконструйований проєкт цих суден з метою зменшення їх габаритних розмірів, осадки та водотоннажності за рахунок розробки полегшених конструкцій металевому корпусу і встановлення легких та ефективних механізмів машинно-котельного відділення [4]. Суднобудівники не забули і про пасажирські пароплави для експлуатації на малих річках, які будувались на заводі у 1934 – 1935 роках за проєктами СБ-14 і СБ-21 та мали такі основні характеристики: потужність 100 к.с., довжина 40,5 м, ширина 10,7 м, осадка 0,75 м, пасажирських місць 240 (рис.3).

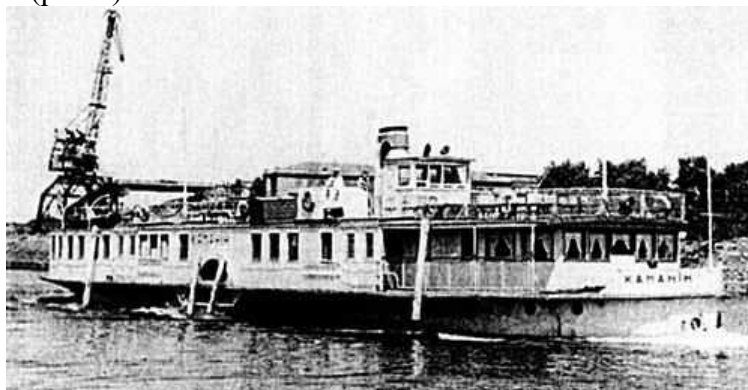


Рисунок 3. Пасажирський пароплав проєкту СБ – 14.

У 1932 році групою молодих інженерів заводу «Л.К.» була спроектована перша у країні клапанна похила парова машина для річкових суден потужністю 400 к.с., яка була виготовлена заводом у 1933 році. Ця машина не поступалась за своїми характеристиками кращим закордонним зразкам та була значно легшою і економічнішою ніж золотникові парові машини. На базі цієї парової машини заводом були спроектовані і запущені у серійне виробництво нові колісні буксирні (проєкт СБ-68) та пасажирські (проєкт СБ-50) пароплави потужністю 400 к.с. Три пасажирських пароплави проєкту СБ-50 (рис.4) залишились на Дніпрі для обслуговування експресної лінії Київ – Херсон. Вони були кращими та найбільш комфортабельними пасажирськими пароплавами довоєнних років.



Рисунок 4. Пасажирський пароплав проєкту СБ – 50 для експресної лінії Київ – Херсон (1938 р.).

Таким чином, до початку Другої світової війни на Дніпрі та його притоках (насамперед Десні) існував досить потужний флот, створений завдяки самовідданій праці суднобудівників Київського заводу «Ленінська кузня» (сучасна назва заводу «Кузня на Рибальському»).

Але у 1941 році на Українську землю прийшла війна, у ході якої був майже повністю знищений річковий флот, і коли у 1944 році Дніпро та Десну було звільнено для річкових перевезень, невідкладні проблеми відбудови народного господарства України вимагали швидкого вводу в експлуатацію нових суден [5].



Рисунок 5. Буксирний пароплав проєкту № 733.

Тому, беручи до уваги неможливість забезпечення суден у перші повоєнні роки дизельними двигунами та дизпаливом, перед СКБ заводу «Л.К.» було поставлено завдання по створенню проєктів та технічної документації для будівництва буксирних та пасажирських пароплавів, враховуючи досвід будівництва подібних суден у довоєнні роки. Першими суднами, спроектованими та збудованими у цей період, були буксирні пароплави проєктів № 732 потужністю 400 к.с. для роботи на середньому Дніпрі та № 733 потужністю 200 к.с. (рис.5) для ділянок річок з мілководним звивистим річищем. Пароплави цих проєктів за робочими кресленнями заводу будувались також на інших підприємствах, включаючи завод Обуда в Угорщині. Слід відзначити, що досвід експлуатації пароплавів проєктів № 732 та № 733 засвідчив їх гарну та безвідмовну роботу протягом багатьох років. Нагадаємо, що у 1948 році групі працівників заводу «Л.К.» за розробку проєкту та початок будівництва цих суден були присвоєні почесні звання лауреатів Державної премії. Серед нагороджених начальник СКБ Г.П.Солдак, головний конструктор О.Б.Байбаков та провідний конструктор проєкту І.Л.Зейгермахер [3]. На базі парових машин ПМ-6 та парових котлів КВ-5 буксирних

пароплавів проєкту №732 заводом був спроектований пасажирський річковий колісний пароплав проєкту № 737 (рис.6), потужність якого становила 450 к.с. Ця потужність була досягнута за рахунок збільшення числа обертів тієї самої парової машини ПМ-6 (рис.7). Довжина пароплава становила 71,4 м, ширина з колесами 15,7 м, висота борту 2,7 м, осадка 1,15 м, швидкість до 22 км/год, пасажирських місць 360. Головний пароплав проєкту № 737 був спущений на воду у 1951 році, а наступні 4 судна завод побудував протягом 1952 – 1953 років. За робочими кресленнями «Л.К.» ці пароплави будували також на суднобудівному заводі в Обуда (Угорщина), на якому до 1958 року було збудовано 76 таких суден.



Рисунок . 6. Пасажирський пароплав проєкту № 737.

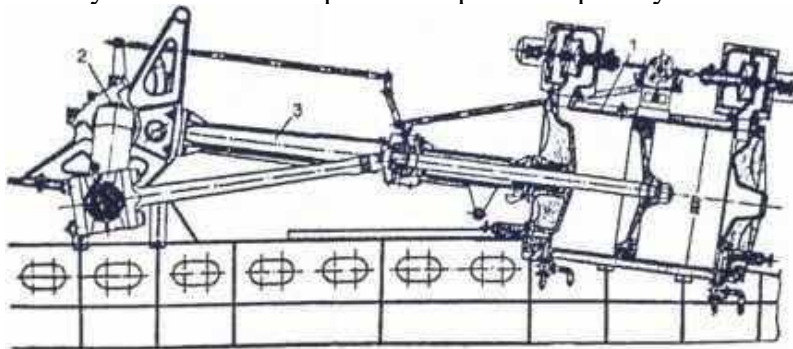


Рисунок .7. Схема парової машини ПМ - 6.

Але, як відомо, ефективність парової машини є набагато нижчою, ніж у двигуна внутрішнього згоряння, вона потребує значно більших розмірів машинного відділення, а реверс та регулювання кутової швидкості обертання валу такої машини було неможливо здійснювати дистанційно з капітанського містка. Тому після того, як післявоєнний розвиток вітчизняної промисловості дозволив забезпечувати нові річкові судна дизельними двигунами та дизпаливом, завод перейшов до проектування та будівництва дизельних річкових теплоходів. Так у 1958 році у ЦКБ заводу «Л.К.» була розроблена проектна та технічна документація озерно-річкового пасажирського двопалубного теплохода класу «О» проєкту № 860 (провідний конструктор Я.Й. Вольфсон). Судна цього проєкту (рис.8), які мали довжину 77 м, ширину 15,2 м, осадку 1,45 м та два дизельних двигуни потужністю по 400 к.с. кожний [6], показали гарні експлуатаційні якості та протягом довгого часу здійснювали пасажирські перевезення на російських річках [7]. Нажаль судна цього проєкту на Дніпрі не використовувались, в Україні не будувались, а розроблену заводом документацію було передано на суднобудівні заводи до Росії та Угорщини.



Рисунок . 8. Пасажирський теплохід проекту № 860.

Для пасажирських перевезень по Дніпру та Дунаю у 1961 році у ЦКБ заводу «Л.К.» був розроблений проєкт № 1867 [3] трипалубного теплохода змішаного плавання (рис.9), який був призначений для роботи на туристичній лінії Київ – Дунай (провідний конструктор проєкту Я.Й.Вольфсон). Але, нажаль, судна цього проєкту в Україні також не будувались, а замість них на Дніпрі з'явилися пасажирські теплоходи проєктів № 301 та №302 виробництва НДР, які на згаданій лінії взагалі не використовувались.

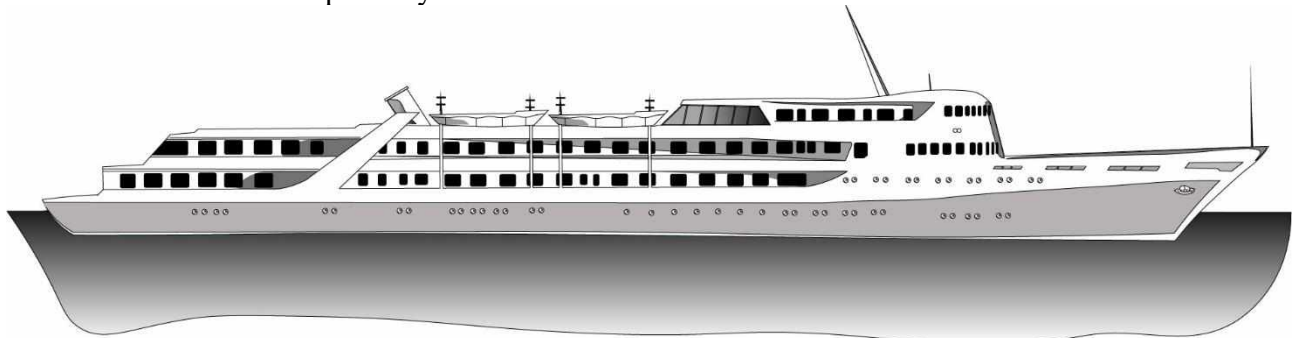


Рисунок . 9. Проєкт пасажирського теплохода для лінії Київ – Дунай (пр. № 1867).

Завод «Л.К.» відзначився також розробкою технічної документації та серійним будівництвом, починаючи з 1955 року, озерно-річкових суховантажних теплоходів з вантажними трюмами проєкту № 765 (рис.10) вантажопідйомністю 600 т (довжина 65,7 м, ширина 9,5 м, висота борту 2,8 м, потужність 300 к.с., швидкість до 17 км/год). Ці теплоходи мали поступово замінити буксирні пароплави з баржами, враховуючи незручності при проходженні караванів барж через шлюзи гідроелектричних станцій, які почали будувати на Дніпрі. Слід відзначити, що «Л.К.» став головним підприємством також і по теплоходах проєкту № 765 передаючи технічну документацію для будівництва цих суден ще двом заводам [3].



Рисунок 10. Суховантажний озерно – річковий теплохід проекту № 765 (1959 р.).

Макети практично всіх згаданих тут річкових суден, що проектувались та будувались на заводі «Кузня на Рибальському» після Другої світової війни можна побачити в експозиції Державного політехнічного музею ім. Бориса Патона [8], який знаходиться на території Національного технічного університету України.

Однак найбільший обсяг вантажних перевезень належить насипним вантажам, для яких судна проекту №765 є непридатними і тому у 1956 році було створено проєкт №414 однопалубного суховантажного теплохода – площадки типу «СТ» для транспортування масових вантажів (рис.11) [9], а також проєкт №414Н з відсіками для перевезення нафтопродуктів. Це двогвинтовий теплохід вантажопідйомністю 600 т з надбудовою та машинним відділенням у кормовій частині, основні характеристики якого вказані в таблиці 1.

В Україні теплоходи проєкту №414 будувались починаючи з 1957 р. на суднобудівельно-судноремонтних заводах у містах Києві (КССРЗ) та Херсоні (ХССРЗ). До недоліків суден цього проєкту можна віднести невелику вантажопідйомність та не дуже комфортні умови для членів екіпажу.



Рисунок . 11. Суховантажний річковий теплохід-площадка типу «СТ» проекту № 414.

Тому на початку 70-х років минулого століття на Чорнобильській ремонтно-експлуатаційній базі флоту почалось будівництво суховантажних річкових теплоходів типу «Прип'ять» (рис.2) вантажопідйомністю 800 т, призначених, в основному, для перевезення

насипних вантажів. Основні характеристики суден цього проєкту під номером 998АК, які повинні були замінити теплоходи проєкту №414, вказані в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики суден цього проєкту під номером 998АК

№ проєкту	414	998	559Б
Клас реєстру	Р	Р	О
Довжина, м	65,2	75	85
Ширина, м	10,36	10	15,4
Висота борту, м	2	2	2,2
Осадка, м	1,5	1,8	2,3
Водотонажність, т	800	1040	1770
Потужність головних двигунів, к.с.	2x150	2x225	2x400
Швидкість, км/год	15	17	15
Екіпаж, осіб	10	8	11



Рисунок 12. Суховантажний теплохід проєкту № 998АК.

Це двогвинтовий теплохід з надбудовою та машинним відділенням у кормовій частині, але на відміну від проєкту №414, із значно поліпшеними умовами для перебування членів екіпажу, які розміщувались у 1-2-місних просторах каютах. На теплоході передбачена зручна їдальня, а також поліпшена звукоізоляція між машинним відділенням та житловими приміщеннями. Капітанський місток на судах проєкту №998 розташований вище, ніж на проєкті №414, через збільшення висоти надбудови, що дало можливість перевезення тарно-штучних вантажів зі збільшеною габаритною висотою (наприклад контейнерів). Всього на Чорнобильській РЕБ було збудовано 14 теплоходів типу «Прип'ять», які використовувались для перевезень по Дніпру як насипних вантажів, так і контейнерів.

Звичайно, вантажні теплоходи згаданих проєктів, які були побудовані на вітчизняних заводах, допомогли відновити, особливо у повоєнні роки, вантажні перевезення на річках України, але найбільший внесок у ці перевезення здійснили суховантажні теплоходи-площадки проєкту №559 (типу «Запоріжжя»), спеціально призначені для роботи на середньому та нижньому Дніпрі. Головним управлінням Дніпровського річкового пароплавства було розроблено проєкт та з 1961 року організовано будівництво вказаних теплоходів на Київському суднобудівельно-судноремонтному заводі (КССРЗ). Судно проєкту №559Б (рис.13) являло собою двогвинтовий теплохід вантажопідйомністю 1200 т з надбудовою та машинним відділенням у кормовій частині. Основні характеристики цих суден вказані в таблиці 1.



Рис.13. Суховантажний озерно – річковий теплохід проекту № 559.

Після початку будівництва суден типу «Запоріжжя» проєкт № 559Б постійно вдосконалювався, в результаті чого були створені проєкти № 559Д з потужністю головних двигунів 2х540 к.с. та № 559М з підсиленням корпусом, збільшеною висотою борту та модернізованими системою енергозабезпечення і навігаційного обладнання, що давало можливість виходу суден у прибережні морські води з наданням їм класу реєстру М. В подальшому теплоходи проєктів №559Д та частково №559Б експлуатувалися з баржами-приставками, що значно збільшувало ефективність вантажних перевезень. Серійне виробництво теплоходів за проєктом № 559 було налагоджено також у Росії, де з 1963 року такі судна будувались під назвою «Окский» для перевезення вантажів по річці Ока.

Поступова заміна пароплавів теплоходами стосувалась також пасажирських суден, призначених для експлуатації на малих річках. Для цього у 1954 році Київським ЦПКБ – 10 був розроблений проєкт № 331 пасажирського теплохода з двома водометними рушіями для роботи на мілководних річкових плесах [10]. Теплоходи цього проєкту, які отримали клас Регістру «Р» (річкове судно) і були призначені для перевезення 162 пасажирів, мали довжину 49,3 м, ширину 8,3м, осадку 0,8 м та два дизельні двигуни типу ЗД6 потужністю по 150 к.с. кожний, які дозволяли суднам рухатись зі швидкістю 19 км/год. Першу серію з п'яти таких суден (рис.14) було запущено у виробництво на Київському суднобудівельно-судноремонтному заводі. Головне судно серії теплохід «Олександр Довженко» був спущений на воду вже у 1956 році і з того часу здійснював регулярні рейси між Києвом та Черніговом.



Рисунок 14. Пасажирський теплохід для малих річок проєкту № 331.

Крім КСРЗ теплоходи за проєктом № 331 будувались на кількох російських заводах та експлуатувались на багатьох російських річках, причому на цих теплоходах, збудованих після 1959 року, водомети були замінені на гребні гвинти, що призвело до необхідності збільшення

допустимої глибини під днищем судна, при якій вони могли безпечно рухатись після такої зміни рушія.

Однак, створення водосховищ на території нашої країни, як вже згадувалось, зумовило необхідність будівництва суден для озерного та річкового плавання, які повинні були мати клас реєстру «О». Тому у 1952 році на Херсонському суднобудівельно-судноремонтному заводі (ХССРЗ) почалось серійне виробництво двогвинтових теплоходів типу «ОМ» за проєктом № 780 (рис.15), які були призначені для роботи на приміських та міжміських лініях малої та середньої протяжності [11]. Крім основного використання на пасажирських лініях ці судна працювали також як службово-роз'їзні, науково-дослідницькі та навчальні. Теплоходи цього проєкту отримали клас реєстру «О», вони мали довжину 42,5 м, ширину 7,12 м, осадку 1,46 м та два дизельні двигуни потужністю по 150 к.с. кожний, які дозволяли їм рухатись зі швидкістю 20 км/год.



Рисунок 15. Пасажирський озерно – річковий теплохід типу «ОМ» (пр. № 780).

Знайомство з історією річкового суднобудування в Україні було б неповним без згадки про будівництво теплоходів для місцевих пасажирських перевезень. Адже ще у 1936 році конструкторським бюро Київського суднобудівельно-судноремонтного заводу (КССРЗ) був розроблений проєкт теплохода, відомого під номером ПТ – 101 і запущений у виробництво на Запорізькому ССРЗ, який, крім ремонту, мав досвід власного будівництва суден. Всього на ЗССРЗ було побудовано вісім суден цього проєкту (ПТ101 - ПТ108), перше з яких було спущене на воду у 1936 р. Це двогвинтовий теплохід з надбудовою (рис.16), призначений для масового перевезення пасажирів на приміських та місцевих лініях, оснащений двома дизельними двигунами типу ЗД6 потужністю по 150к.с. кожний.

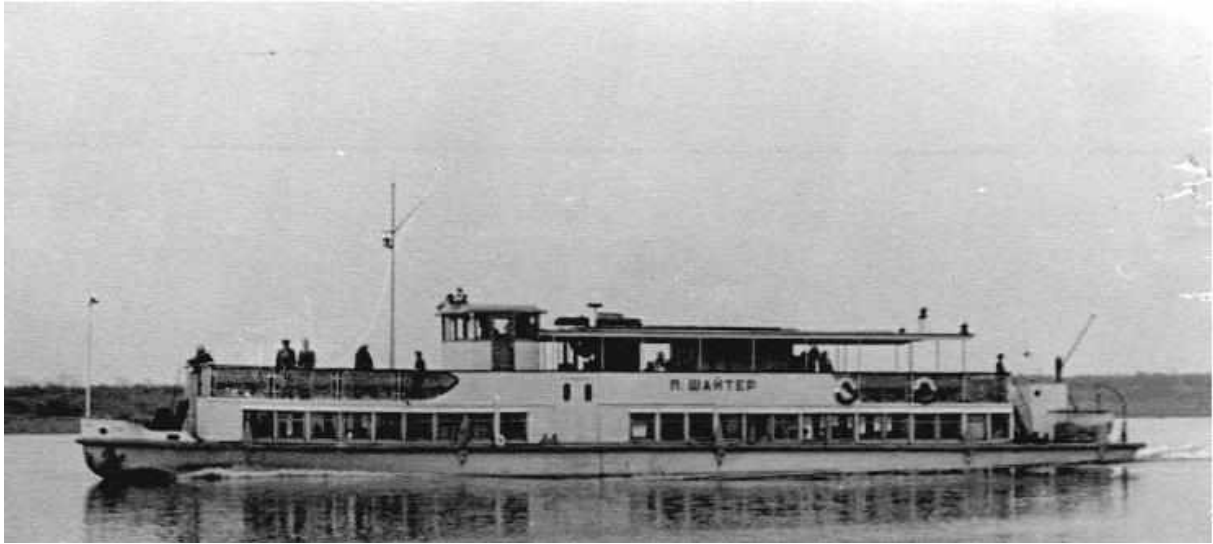


Рисунок 16. Пасажирський теплохід «М. Шайтер» (ПТ-105) на Десні.

До послуг пасажирів на верхній відкритій палубі, кормова частина якої була вкрита тентом, розміщувались зручні дерев'яні сидіння, а нижче у надбудові, частково зануреній у корпус судна, знаходились два салони з м'якими сидіннями. На верхній палубі також був передбачений буфет. Такі зручності для пасажирів давали можливість використовувати судно також для прогулянкових та екскурсійних рейсів. Основні характеристики теплоходів проекту ПТ-101 вказані у табл.2. Ці теплоходи будувались на ЗСРСР як до початку Другої світової війни, так і після її закінчення та працювали на приміських пасажирських лініях у найбільших портах на середньому і нижньому Дніпрі, а також на Десні.

Таблиця 2 Основні характеристики теплоходів проекту ПТ-101

Проект	ПТ-101	544	839
Клас реєстру	Р	Р	О
Довжина (м)	30,55	27,25	29,54
Ширина (м)	6,0	4,80	5,21
Висота борту (м)	1,1	1,4	2,4
Осадка (м)	0,70	0,77	1,22
Пасажирських місць	250	150	138
Потужність двигунів (к.с.)	2×150	150	150
Швидкість (км/год)	18	20	19
Екіпаж	3	2	3

Для післявоєнного відновлення місцевих пасажирських перевезень річковим транспортом на ХСРСР з 1949 року було налагоджено серійне виробництво більш економічних теплоходів за проектом №544 (рис.17).



Рисунок 17. Пасажирський річковий теплохід для місцевих перевезень проєкту №544.

Теплоходи цього проєкту, основні характеристики яких вказані у табл.2, використовувались для міських та приміських пасажирських перевезень на короткі відстані, а також як прогулянково - екскурсійні судна в усіх портах на середньому та нижньому Дніпрі. Пасажири на борту теплохода розміщувались у двох салонах в носовій та кормовій частинах, що знаходились у надбудовах, частково занурених у корпус судна, а також на відкритій палубі, кормова частина якої була вкрита тентом.

При значному зростанні пасажиропотоку, наприклад до місць масового відпочинку у вихідні дні, теплоходи цього проєкту обладнувались зчіпними пристроями для штовхання пасажирських барж – приставок, спеціально збудованих на ХССРЗ, що давало можливість додатково перевезти під час рейсу до 90 пасажирів.



Рисунок.18. Пасажирський озерно – річковий теплохід для місцевих перевезень проєкту № 839.

Однак, для експлуатації на Дніпровських водосховищах теплоходи проєктів № 544 та ПТ-101 були непридатними і тому з 1956 року той самий ХССРЗ розпочав будівництво річкових пасажирських теплоходів типу «МО» (мало-озерний) за проєктом № 839 (рис.18). Це одновинтовий теплохід з надбудовою, призначений для масового перевезення пасажирів на приміських та місцевих лініях [12]. Крім цього, теплоходи проєкту №839 використовувались в якості роз'їзних суден шляхових і технічних служб, а також як навчальні та науково-дослідницькі. Їх основні характеристики теж можна побачити у табл.2.

Висновки. Згадуючи історію розвитку Українського річкового флоту в нелегкі для нашої держави часи, дуже велике занепокоєння викликає сучасний стан цього флоту, який фактично зник як з самого Дніпра, так і з його мальовничих притоків. Тому головне завдання цієї роботи ми бачимо у приверненні уваги громадськості до необхідності відновлення у нашій країні вантажного та пасажирського судноплавства.

THE EMERGENCE, DEVELOPMENT AND ACHIEVEMENTS OF RIVER SHIPBUILDING IN UKRAINE (1823-1963)

This article is devoted to the history of the design, construction and operation of ships from the Ukrainian river fleet, during the period of 1823 to 1963, as well as the activities of the main shipbuilding enterprises of Ukraine that ensured cargo and passenger transportation on the rivers of our country. The article analyses the composition of the river fleet depending on sailing conditions and draws attention to the need to build ships for cargo and passenger transportation not only on the Middle and the Lower Dnipro river, but also on smaller rivers (for example, the Desna). The article mentions ship projects developed in Ukraine, in particular, project number 860 for operation on the Dnipro river and project number 1867 with the right to enter sea waters, which were not built in our country, but after their significant modernisation could be used for the construction of modern passenger ships.

Key words: Ukraine, shipbuilding, the Dnipro river, small rivers, cargo and passenger river fleet

ЛІТЕРАТУРА

1. Історичні нариси з розвитку техніки в Україні: колективна монографія / За заг. ред. Гріффена Л.О. – К. : Талком, 2023. – 440 с.
2. Цюпа А.М. Пароплави Дніпровського флоту – від давнини до сучасності / А.М. Цюпа // Дослідження з історії техніки. – Вип. 24, 2018. – С. 10 – 14.
3. Байбаков А.Б. Завод «Ленинская кузница» / А.Б. Байбаков, Р.С. Кац. – К. : Гостехиздат УССР, 1962. – 174 с.
4. Солдак Г.Ф. Буксирные п/х мощностью в 150 и 300 л.с. для реки Днепра / Г.Ф. Солдак // Судостроение. - № 6 (192), 1935. – С. 50 – 52.
5. Цюпа А.М. З історії розвитку парового флоту України (1928 – 1958 рр.) / А.М. Цюпа // Питання історії науки і техніки. - № 1, 2017. – С. 28 – 32.
6. Вольфсон Я.И. Теплоход «Ерофей Хабаров» / Я.И. Вольфсон, С.С. Страшун // Судостроение. - № 3 (197), 1959. – С. 78.
7. Цюпа А.М. Теплоходи типу «Ерофей Хабаров» - перший Український проект озерно-річкового пасажирського судна / А.М. Цюпа // Питання історії науки і техніки. - № 2, 2017. – С. 29 – 32.
8. Цюпа А.М. Відновлення транзитного річкового флоту України з 1944 по 1958 рр. в експозиції Державного Політехнічного музею при НТУУ «КПІ» / А.М. Цюпа // Питання історії науки і техніки. - № 3, 2016. – С. 31 – 35.
9. Цюпа А.М. З історії будівництва вантажних теплоходів для Українського річкового флоту (1945 – 1985 рр.) / А.М. Цюпа // Матеріали 19-ї Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні питання історії науки і техніки». – К. : 2020. – С. 282 – 286.
10. Цюпа А.М. Перші українські проекти пасажирських суден для малих річок / А.М. Цюпа // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – Вип. 1(35), 2022. – С. 135 – 139.
11. Сиваченко В.А. Теплоходи типу «ОМ» - перший проект середньо-магістрального багатоцільового озерно - річкового пасажирського судна / В.А. Сиваченко, А.М. Цюпа, Е.В. Лук'яненко // Збірник праць 20-ї Міжнародної молодіжної науково – практичної конференції «Історія розвитку науки, техніки та освіти». – К. : 2022. – С. 53 – 56.
12. Цюпа А.М. З історії створення Українського річкового флоту для місцевих пасажирських перевезень / А.М. Цюпа // Матеріали 21-ї Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні питання історії науки і техніки». – К. : 2022. – С. 212 – 216.

АВТОРИ ВИПУСКУ

Боріна Маргарита Вікторівна	—	здобувачка ступеня PhD кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій
Васалатій Надія Василівна	—	Одеський національний морський університет, кафедра навігації і керування судном, к.георг.н., доцент orcid: 0000-0002-7188-9922
Войченко Тетяна Олександрівна	—	кандидат економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-0109-4622
Волкова Анна Сергіївна	—	Херсонська державна морська академія, викладач кафедри англійської мови з підготовки морських фахівців за скороченою програмою, orcid.org/0000-0003-3518-5677
Волков Олександр Миколайович	—	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри навігації Національного університету «Одеська морська академія». orcid.org/0000-0002-6742-4217
Врублевський Роман Євгенович	—	к.т.н., доцент, Херсонська державна морська академія, доцент кафедри експлуатації судових енергетичних установок, orcid.org/0000-0001-8686-3488
Гаценко Лариса Володимирівна	-	здобувачка ступеня PhD кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0001-9894-8622
Голіков Володимир Володимирович	—	професор, доктор технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», професор кафедри управління судном orcid.org/0000-0003-1591-3016
Головань Андрій Ігорович	—	кандидат технічних наук, доцент, Одеський Національний морський університет, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, orcid.org/0000-0001-6589-4381
Голубєва Світлана Михайлівна	—	старший викладач кафедри судових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Державного університету інфраструктури та технологій, здобувачка ступеня PhD кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту; orcid 0000-0001-8285-7566
Гусак Ірина Леонідівна	—	ступеня PhD кафедри навігації і управління суднами, Державного університету інфраструктури та технологій orcid.org/0000-0002-1546-5914
Дакі Олена Анатоліївна	—	доктор технічних наук, професор, директор Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0003-3932-462X
Дзигар Анатолій Костянтинович	—	механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, orcid.org/0000-0001-5947-6263
Дудченко Сергій Валерійович	—	Капітан далекого плавання, старший викладач кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, директор ТОВ «Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр при Херсонській державній морській академії». orcid.org/0000-0002-1613-7226

Іваненко Віталій Миколайович	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0003-3271-5257
Калініченко Євгеній Володимирович	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського Національного Морського Університету, https://orcid.org/0000-0003-2898-7313
Катрич Альона Валентинівна		старший викладач кафедри соціально-гуманітарних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
Кириченко Олександр Сергійович	–	к.т.н., доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, ORCID 0000-0003-0545-4493
Мадей Володимир Васильович	–	аспірант кафедри навігації Національного університету «Одеська морська академія». orcid.org/0000-0002-8692-9077
Медведєва Олена Юріївна		доцент кафедри суспільно-гуманітарних дисциплін, Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-0497-5767
Маннапова Оксана Володимирівна	–	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-6871-3272
Мельник Ольга Володимирівна	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, orcid.org/0000-0001-9894-8622
Маранов Олександр Вікторович	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації і упорядкування суднами Державного університету інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-5854-0240
Пліта Леонід Леонідович	–	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-6422-444X
Пріступа Сергій Валерійович	–	старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, ORCID 0009-0002-9323-1133
Рященко Оксана Іванівна	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті, Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-9242-0752
Сатулов Анатолій Іванович	–	д.т.н., професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, http://orcid.org/0000-0001-8185-8209
Сагін Арсеній Сергійович	–	Здобувач ступеня PhD кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», orcid.org/0009-0000-4965-6121

Сагін Сергій Вікторович	—	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія». https://orcid.org/0000-0001-8742-2836
Сагін Сергій Сергійович	—	аспірант кафедри навігації Національного університету «Одеська морська академія», orcid.org/0009-0008-4147-5172 .
Сінюта Катерина Олександрівна	—	асистент кафедри теорії та устрою судна, Національний університет «Одеська морська академія», orcid.org/0000-0003-1526-6912
Сітков Олексій Михайлович	—	старший викладач кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, orcid.org/0000-0002-9171-6674
Сорока В'ячеслав Володимирович	—	здобувач кафедри завідувач кафедри енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-7581-7141
Строєнко Наталія Георгіївна		старший викладач кафедри суспільно-гуманітарних дисциплін, Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0002-4119-7618
Тараненко Сергій Володимирович	—	к.т.н., доцент, завідувач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, orcid 0000-0001-9320-2514 ;
Трофименко Ірина Валеріївна	—	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
Тришин Вячеслав Валентинович	—	старший викладач кафедри СВЕТС на ВТ, Дунайський інститут водного транспорту
Урум Наталія Степанівна	—	кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid.org/0000-0003-2493-9314
Шапіро Ганна Владиславівна	—	здобувачка ступеня PhD, кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, orcid: 0000-0003-4245-9365
Шевченко Антон Петрович		доктор філософії, старший викладач кафедри СВЕТС на ВТ, Дунайський інститут водного транспорту
Ярмак Віктор Леонідович	—	здобувач ступеня PhD, кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій