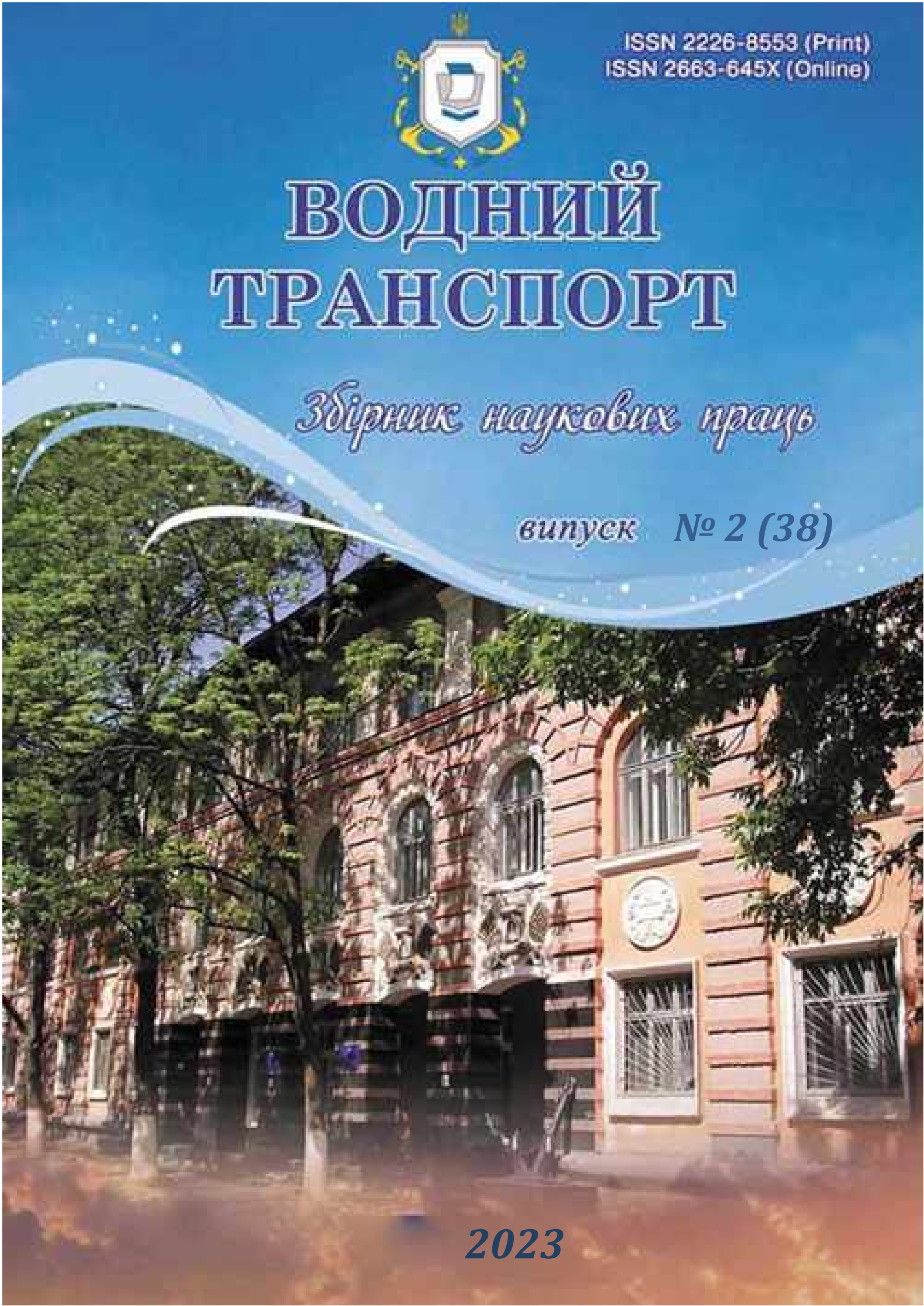
ISSN 2226-8553 (Print)
ISSN 2663-645X (Online)

ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Збірник наукових праць

випуск № 2 (38)



2023

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 2 (38)

Київ
2023

***ISSN 2226-8553* (*Print*)** ***ISSN 2663-645X* (*Online*)**

Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2023. – Випуск 2 (38). – 356 с. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38

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 морській 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 № 5 від 11.12.2023 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).

© Державний університет інфраструктури та технологій, 2023

ЗМІСТ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Маранов О.В.
Метод автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна 6

Чередник В.М., Гаценко Л.В.
Дослідження імітаційної моделі дискретизації вимірювальних сигналів щодо мінімуму похибки відновлення інформації 13

Головань А.І.
Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден 27

Давидов В.С., Кліндухова В.М., Ляшко О.В., Любарець І.О.
Про створення математичної моделі руху великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі в складних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах плавання 37

Сокол А.О.
Людський елемент, як складова ризику виникнення небажаної події на морському судні 49

Kalinichenko Y., Zaiets A.
Concepts of the development of a civil network system of underwater traffic control 55

Ганношина І.М.
Розроблення пропозицій щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС судна 66

Гончарук І.П., Никифоров Ю.О. Кошарська Л.В. , Головань А.І.
Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту 73

Nosov P.S.
Systemic approaches to rational management of functional marine technical systems and complexes 80

Богом`я В.І.
Метод розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки безпілотного підводного апарату 96

Дубинець О.І.
Модель автоматизованого виявлення спектральних аномалій у витраті дизелів морського судна з використанням автоенкодера із подавленням шуму 102

Нікітін П.В., Гусак І.Л.
Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при виконанні морських перевезень 108

Савчук В.П., Зінченко Д.О., Кочетов Г.А., Дзигар А.К.
Аналіз працездатності підшипників шатуна середньообертового двигуна hyundai himsen h25/33 при експлуатації з допустимими значеннями зазорів без ремонту 115

Савчук В.П., Курносенко Д.В., Білоусов Є.В. Сатулов А.І.
Експериментальні дослідження впливу типових несправностей на функціональні параметри систем змащування високообертових дизелів 128

Корякін К.С.
Забезпечення експлуатаційного рівня надійності суднового радіолокаційного обладнання 142

Постніков Є.Є.
Модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання 151

Зазірний А.А.
Визначення та контроль місця положення судна з використанням нечіткої логіки 157

Сагін С.В., Заблоцький Ю.В.
Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту 164

Сагін С.В., Бондар С.А.
Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту 175

Сагін С.В., Сагін С.С.
Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження 187

Булгаков М.П., Бурлаченко Д.А., Никитюк П.В., Щенявський Г.С., Кучеренко В.П.
Інноваційні підходи до управління баластними водами на суднах шляхом дистанційного моніторингу та контролю за їх якістю 198

Яремчук С.О., Маслов І.З.
Фотоелектричні системи на судні: фізичний експеримент та аналіз з використанням штучного інтелекту 207

Старцев О. М., Крамаренко В. В., Червоний О.Д.
Структури і зміст факторів, що впливають на рівень безпеки судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті 222

Чимшир В.І., Даниленко О.Б., Шульга Ю.М.
Безпека судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті як об'єкт наукових досліджень 231

Трофименко І.В., Урум Н.С., Іваненко В.М., Федунов В.М.
Використання інфрачервоного діапазону випромінювання небесних світил для навігації морських суден 241

Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Колесник В.В.
Розробка підходів до фільтрації неактивної та активної напруги на шинах електропостачання в судновій електроенергетичній системі 252

Войченко Т.О., Гімпель Р.М., Шевченко А.П., Маннапова О.В.
Моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок..... 260

Войченко Т.О., Шевченко А.П., Маннапова О.В., Рященко О.І.
Дослідження напрямків зниження вібрації, викликаної енергетичним обладнанням, на основі моделювання одновісної віброізоляції суднового дизель-генератора..... 269

Дудченко С.В.
Удосконалення математичної моделі навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден 277

Шапран Ю.Є.
Аналіз робочого процесу дизеля при використанні води в якості присадки до палива 286

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

Горалік Є.Т., Лупіна Т.О.
Деякі задачі про остійність плавзасобів в курсах теоретичної та прикладної механіки 291

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ткаченко К.О., Ісаченко Б.О.
Використання гейміфікації в інтелектуальних навчальних системах та їх вебдизайні 299

Ткаченко О.І., Шиян Я.А.
Моделювання маркетингової діяльності: онтологічний підхід 312

Ткаченко О.А., Болячевець Я.Ю.
Деякі аспекти розробки та використання сучасних вебдодатків 323

Богом'я В.І.
Особливості використання штучного інтелекту та машинного навчання для виявлення та запобігання кібератак 335

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Лопатюк С.П.
Особливості екологічного маркетингу на внутрішньому водному транспорті 344

АВТОРИ ВИПУСКУ 264

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 629.5.047.52 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.01

Маранов О.В.

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ АНАЛІЗУ РЕСУРСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ СУДНА

Метою статті є підвищення якості оцінки та підвищення ресурсу експлуатації конструкцій судна за рахунок автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна. Ресурс експлуатації листових конструкцій суден має велику актуальність в сучасній морській індустрії. Зі зростанням світового морського транспорту та важливості безпеки судноплавства оцінка та керування ресурсом стали ключовим аспектом забезпечення надійності та тривалої експлуатації суден. Ретельне та систематичне вивчення стану листових конструкцій, визначення залишкового терміну служби та планування технічного обслуговування стають критичними для запобігання аваріям, забезпечення безпеки на морі та економії ресурсів. При цьому треба зазначити, що автоматизований аналіз ресурсу експлуатації суднових листових конструкцій відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки суден, збереженні ресурсів і підвищенні ефективності в морській індустрії. Основним результатом статті є метод автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна. Запропонований метод включає в себе кілька кроків, включаючи обґрунтування ймовірнісної моделі зносу, вибір найкращого розподілу для оцінки стану конструкцій, вимірювання остаточних товщин листових елементів корпусу судна та розрахунок їхнього ресурсу експлуатації. Автоматизація цього процесу дозволяє покращити точність оцінки та забезпечити оптимальний регламент обслуговування, що, в свою чергу, може підвищити тривалість служби судна та зменшити ризики аварій. Для подальших досліджень можливі такі напрямки: розширення моделі для вивчення інших видів дефектів та їх впливу на ресурс листових конструкцій, вдосконалення методу через розробку більш точних методів вимірювання та аналізу стану конструкцій, впровадження сучасних технологій, таких як датчики та штучний інтелект, для поліпшення автоматизації та точності аналізу, а також розгляд додаткових факторів, які впливають на ресурс конструкцій судна, таких як швидкість судна, погодні умови, солоність води тощо. Загальна мета таких подальших досліджень полягає в подальшому підвищенні безпеки морських перевезень, збільшенні тривалості служби суден та оптимізації управління їх ресурсами.

***Ключові слова**: ресурс експлуатації, листові конструкції, автоматизація аналізу, безпека судноплавства, ймовірнісна модель зносу, метод автоматизації, термін служби. надійність, безвідмовність, технічний стан, засіб водного транспорту, безвідмовність, відмова, технічний стан, засіб водного транспорту, процес, експлуатація, суднове обладнання.*

Постановка проблеми. Ресурс експлуатації листових конструкцій суден має велику актуальність в сучасній морській індустрії. Зі зростанням світового морського транспорту та важливості безпеки судноплавства оцінка та керування ресурсом стали ключовим аспектом забезпечення надійності та тривалої експлуатації суден. Ретельне та систематичне вивчення стану листових конструкцій, визначення залишкового терміну служби та планування технічного обслуговування стають критичними для запобігання аваріям, забезпечення безпеки на морі та економії ресурсів.

Аналіз ресурсу експлуатації листових конструкцій суден сьогодні має велике значення в морській індустрії. Зі зростанням глобальної торгівлі та збільшенням обсягів морського транспорту виникає все більше серйозних завдань забезпечення безпеки та надійності

судноплавства. Підтримання в гарному стані листових конструкцій, таких як корпус, палуби та інші елементи судна, є необхідною частиною забезпечення цієї безпеки. Ефективний аналіз ресурсу експлуатації допомагає запобігати аваріям, оптимізувати витрати на обслуговування та збільшувати термін служби суден. При цьому використання автоматизованих систем та передових технологій в цій галузі зменшує вплив людського фактору та забезпечує точніший та оперативний моніторинг, що робить це поняття критично важливим для сучасної морської індустрії.

Автоматизований аналіз ресурсу експлуатації суднових листових конструкцій має важливе значення в сучасній суднобудівній індустрії з таких причин:

1. Підвищення безпеки: автоматизований аналіз дозволяє більш точно і систематично оцінювати стан листових конструкцій судна, що сприяє виявленню потенційних проблем і зменшенню ризику аварій та подій на морі.

2. Оптимізація обслуговування: автоматизовані системи моніторингу та аналізу ресурсу експлуатації суднових листових конструкцій дозволяють оптимізувати графіки технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє знизити витрати й уникнути несподіваних зупинок судна.

3. Підвищення терміну служби: завдяки автоматизованим технологіям можна більш ефективно управляти ресурсом експлуатації суднових конструкцій, що може призвести до збільшення терміну служби судна і зменшення необхідності в капітальних ремонтах.

4. Збереження часу і ресурсів: автоматизований аналіз дозволяє проводити моніторинг і аналіз більш оперативно і точно, що сприяє більш ефективному використанню людських ресурсів і часу.

5. Відповідність нормативам і стандартам: багато морських нормативів і стандартів вимагають регулярного моніторингу та оцінки стану суднових конструкцій. Автоматизований аналіз допомагає дотримуватися цих вимог більш ефективно і точно.

Отже, автоматизований аналіз ресурсу експлуатації суднових листових конструкцій відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки суден, збереженні ресурсів і підвищенні ефективності в морській індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи оцінки та підвищення ресурсу експлуатації різноманітних конструкцій судна, наприклад, які визначені в роботах [1 - 8].

Наприклад, в статті [1] розглядається аналіз надійності обладнання судна на основі даних з технічного обслуговування, надається методика прогнозування надійності конструктивних елементів.

У статті [2] розглядається аналіз надійності морських систем та обладнання на основі методу аналізу режимів відмов та їх наслідків, описується методика прогнозування надійності за конструктивними показниками елементів на етапі проектування.

У статті [3] визначено, що морські турбіни (Marine current turbines (MCTs)) поступово привертають більший інтерес від галузі та багатьох дослідницьких ініціатив завдяки своєму потенціалу як новому світовому енергетичному ресурсу. Проте деякі технологічні проблеми, зокрема виявлення несправностей лопаток MCTs, все ще потребують подальшого прогресу для їх успішного впровадження. Фактично, виробництво електроенергії, ймовірно, поступово погіршується через несправності лопаток, а потім викликає руйнівні перешкоди при підключенні морського генератора струму до мережі. Виявлення несправностей лопаток MCTs залишається складною проблемою через складність підводного середовища. Схоже, що такі прикріплення, як планктон чи біопокриття, можуть суттєво впливати на лопатку турбіни, оскільки вони можуть викликати різні несправності дисбалансу. У статті розглядаються різні типи несправностей лопаток в умовах хвиль та турбулентності. Також розглядаються поточні методи виявлення несправностей лопаток, включаючи багатодоменні підходи. Дослідження показує, що вбудовані методи виявлення несправностей на основі датчиків, які використовують

фазові струми та напруги на обмотках генератора, забезпечують декілька переваг для виявлення несправностей лопаток MCTs.

Метою статті є підвищення якості оцінки та підвищення ресурсу експлуатації конструкцій судна за рахунок автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для оцінки тривалості служби елементів корпусу судна доцільним є використання терміну "строк служби". Нормативи, які регулюють знос, встановлюються з метою забезпечення безпеки, оскільки параметри, що досягають критичних значень, можуть призвести до аварій. Отже, при оцінці тривалості служби елементів корпусу судна було б доцільно використовувати термін "встановлений строк служби", який може бути довший, ніж строк служби судна у разі мінімального зносу розглянутої зони. Проте для об'єктивного визначення довговічності найбільш доцільним буде використовувати показник ресурсу експлуатації елемента з урахуванням ймовірнісного характеру зносу для визначення недосягнення межового стану з встановленою ймовірністю.

Основні вимоги до методу автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна повинні враховувати:

– взаємозв'язок строку служби елементів корпусу судна з експлуатаційно-ремонтним періодом;

– сприяння запобіганню виникненню аварійних ситуацій у міжремонтний період експлуатації;

– правила визначення показників надійності з урахуванням фізичного та ймовірнісного (недетермінованого) характеру процесів старіння та ушкоджень корпусних конструкцій судна;

– правила вибору законів та параметрів розподілу ймовірностей для основних процесів старіння корпусу, таких як зноси;

– можливість використання експлуатаційної та ремонтної документації для отримання необхідної інформації під час проведення розрахунків;

– застосування в інженерній практиці.

Ключовим завданням у розробці автоматизованого методу є обґрунтування ймовірнісної моделі зносу, яка характеризується відповідним законом розподілу ймовірностей для недосягнення межового стану. Найбільш трудомісткою частиною є визначення ймовірнісного закону та параметрів розподілу, тому велике значення має вивчення апроксимуючих властивостей різних двопараметричних розподілів. Запропонований підхід в статті базується на використанні відносної системи координат.

$$\tau = \frac{t}{t_g}, \tag{1}$$

де τ – поточне значення незалежної змінної розподілу;

t – її математичне сподівання, отримане шляхом порівняння відносних ресурсів експлуатації для розподілів, таких як нормальний, логарифмічно нормальний, Вейбула, гамма-розподіл, рівномірний та двопараметричний експоненціальний закони з урахуванням довірчих інтервалів.

Встановлено, що розподіл Вейбула має найкращі апроксимуючі властивості та може бути рекомендований для всіх випадків автоматизованої обробки інформації [9]

$$\frac{t}{t_g} = \frac{1}{K(b)}\left(\ln\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b}}. \tag{2}$$

Це твердження (див. вираз 2) підтверджує вибір розподілу Вейбула для визначення ресурсів експлуатації елементів корпусу судна за середньою стійкістю до зносу та її коефіцієнтом варіації. Цей розподіл зручний для практичного використання, оскільки не є дискретним і багато інших розподілів є його частковими випадками

$$\gamma(t) = e^{-\left(\frac{1}{a}\right)^b}, \tag{3}$$

де, a – параметр масштабу;

b – параметр форми.

При цьому

$$b = f(V), \tag{4}$$

де, V – коефіцієнт варіації.

Вибір розподілу з найкращими апроксимуючими властивостями не є достатнім для побудови ймовірнісної моделі ушкодження. У розглянутому методі враховується процес старіння з лінійною характеристикою, який описується через середню стійкість до зносу та розподіл Вейбула

$$t_\gamma = \frac{H_p - H_y}{K(b)} c_g \left(\ln\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{1}{b}}, \tag{5}$$

де b – параметр форми;

$K(b)$ – коефіцієнт параметра масштабу;

c_g – середня стійкість до зносу;

H_p – максимально допустимий розмір;

H_y – установчий розмір;

y – встановлена ймовірність недосягнення межового стану.

Це вираз показує, що ресурс прямо залежить від стійкості до зносу c:

$$t_\gamma = c(H_p - H_y), \tag{6}$$

і, отже, підпорядковується тому ж закону, що й стійкість до зносу.

Після визначення розподілів недосягнення межового стану (або розподілів ймовірності безвідмовної роботи), виникає завдання визначення ресурсів експлуатації елементів корпусу.

У рамках цього дослідження розглядається один вид пошкоджень корпусних конструкцій судна – знос. Таким чином, акцент робиться на моделях пошкоджень листових конструкцій при зносі.

Основне завдання полягає у визначенні ресурсу експлуатації елементів корпусу судна. У рамках цього методу запропоновано використовувати лінійну функцію зношування такого виду:

$$I(t) = vt, \tag{7}$$

де I – знос (зміна товщини листа) протягом часу t;

v – швидкість зносу.

В якості вхідних даних методу прийняті вимірювання остаточних товщин S_i елементів корпусу судна через певний період його експлуатації t_i.

Знаючи товщину елемента на момент будівництва S_0, можна розрахувати швидкість його зносу:

$$v_i = \frac{S_0 - S_i}{t_i} \tag{8}$$

або використовувати величину, обернену до швидкості зносу – стійкість до зносу:

$$c_i = \frac{1}{v_i}. \tag{9}$$

Тоді

$$c_i = \frac{t_i}{S_0 - S_i}. \tag{10}$$

Отже, ми отримуємо вибіркову сукупність v_i або c_i, обсягом вибірки N.

Надійність подальших автоматизованих розрахунків в значній мірі залежить від точності вимірювань та попередньої підготовки статистичної інформації.

Вхідні дані для розрахунку ймовірності недосягнення межового стану та ресурсів експлуатації елементів корпусу судна.

$$\gamma(X, X_g, V) = e^{-\left(\frac{\mu}{a(X_g,V)}\right)^v}, \quad (11)$$

де,

$$V(b) = \frac{\sqrt{G\left(1+\frac{2}{b}\right)-G(1+\frac{1}{b})^2}}{G(1+\frac{1}{b})}. \quad (12)$$

У першу чергу здійснюються вимірювання остаточних товщин обраних елементів на основі максимально можливої вибірки однотипних судів.

Другим важливим кроком є встановлення зміни досліджуваного параметра. Згідно з вимогами, при допустимій остаточній товщині аркуша (призначеної величини) при загальному зносі визначається виразом

$$[S_i] = m_0 S_0, \quad (13)$$

де, m_0 – коефіцієнт зносу;

S_0 – товщина листа при будівництві.

Отже, строк служби листового конструктивного елемента можна визначити відповідно до виразу.

$$R = \frac{T(1-m_0)}{1-\frac{S_i}{S_0}}. \quad (14)$$

Загальна структура методу автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна наведена на рис. 1.

Отже, автоматизований аналіз ресурсу експлуатації суднових листових конструкцій є неодмінною частиною забезпечення безпеки судноплавства, скорочення витрат і підвищення ефективності у морській галузі.

Висновки. Запропонований метод автоматизованого визначення ресурсу експлуатації елементів корпусу судна на основі даних про дефекти необхідний для обґрунтування планових строків проведення огляду, накопичення інформації для аналізу технічного стану корпусу судна і коригування вимог до корпусних конструкцій будуються судів. Автоматизація процесу визначення ресурсу експлуатації елементів корпусу судна на основі даних про дефекти дозволяє значно підвищити ефективність і точність оцінки терміну служби подібних судів, знижуючи ризики аварій та оптимізуючи планування регулярного обслуговування

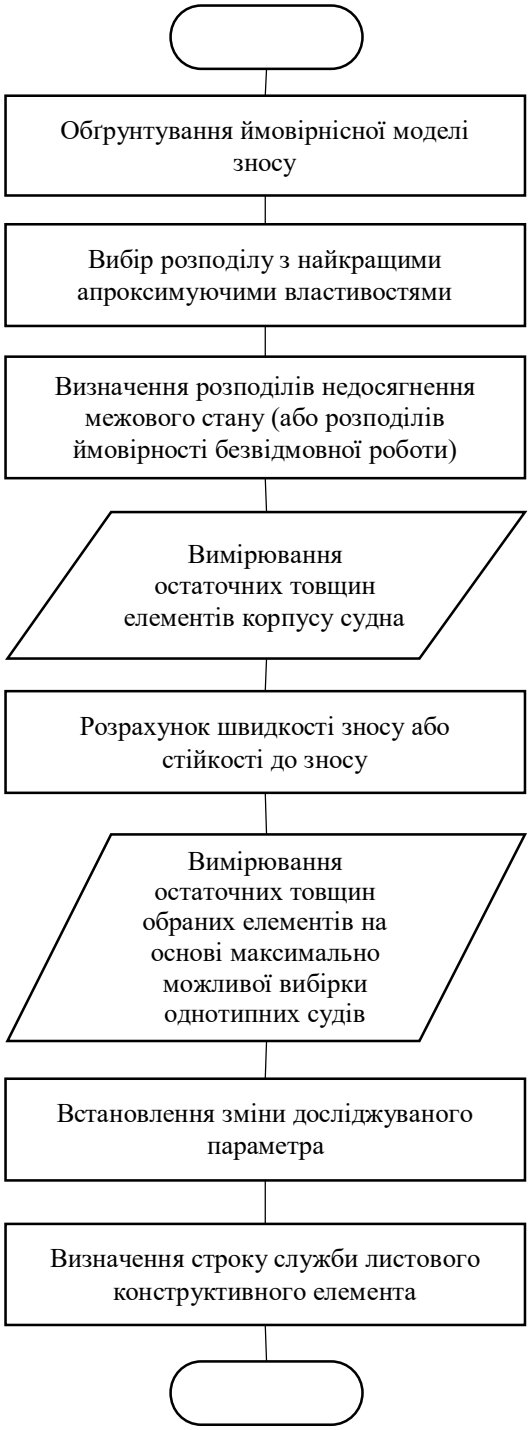


Рисунок 1 – Загальна структура методу автоматизації процесу аналізу ресурсу експлуатації листових конструкцій судна

.

ЛІТЕРАТУРА

1. T. Xu, Y. Qian, Z. Hu and C. Dandan, "Reliability analysis of ship equipment based on maintenance data," 2014 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan), Zhangjiajie, China, 2014, pp. 530-535, doi: 10.1109/PHM.2014.6988229.

2. Zhang, P.; Gao, Z.; Cao, L.; Dong, F.; Zou, Y.; Wang, K.; Zhang, Y.; Sun, P. Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy. *Machines* 2022, *10*, 72. https://doi.org/10.3390/machines10020072.

3. Xie, T.; Wang, T.; He, Q.; Diallo, D.; Claramunt, C. A review of current issues of marine current turbine blade fault detection. Ocean. Eng. 2020, 218, 108194.

4. Nian, F. Viewpoints about the prognostic and health management. Chin. J. Sci. Instrum. 2018, 39, 1–14.

5. Lan, F.; Jiang, Y.; Wang, H.Y. Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine. In Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Applied Mathematics, Modeling and Simulation, Shanghai, China, 20–21 September 2020; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; Volume 1670.

6. Volponi, A.J.; Brotherton, T.; Luppold, R.; Simon, D.L. Development of an Information Fusion System for Engine Diagnostics and Health Management. In Proceedings of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, IL, USA, 20–22 September 2004.

7. Lee, J.; Wu, F.; Zhao, W.; Ghaffari, M.; Liao, L.; Siegel, D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. Mech. Syst. Signal. Pr. 2014, 42, 314–334.

8. Rao, X.; Sheng, C.; Guo, Z.; Yuan, C. A review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines. Mech. Syst. Signal Process. 2022, 165, 108385.

9. Zheng Ming, Yang Yi and Zheng Yu, "Estimating parameters in Weibull distribution by grouped data", *University Journal of Applied Mathematics: Edit A*, vol. 18, no. 3, pp. 303-310, 2003.

Maranov O.

METHOD FOR AUTOMATING THE ANALYSIS OF THE SERVICE LIFE OF SHEET STRUCTURES OF A SHIP

The aim of the article is to enhance the quality of assessment and increase the service life of ship structures through the automation of the service life analysis process of sheet structures. The service life of sheet structures of vessels is highly relevant in the modern maritime industry. With the growth of global maritime transportation and the importance of maritime safety, the assessment and management of service life have become key aspects in ensuring the reliability and extended service life of vessels. Thorough and systematic examination of the condition of sheet structures, determination of the remaining service life, and maintenance planning have become critical for preventing accidents, ensuring maritime safety, and conserving resources. It is worth noting that automated analysis of the service life of sheet structures plays a pivotal role in enhancing ship safety, resource preservation, and efficiency in the maritime industry. The primary outcome of the article is a method for automating the analysis of the service life of sheet structures of a ship. The proposed method involves several steps, including the establishment of a probabilistic wear model, selection of the best distribution to assess the state of structures, measurement of final thicknesses of sheet elements in the ship's hull, and calculation of their service life. Automating this process improves the accuracy of assessment and ensures an optimal maintenance schedule, which, in turn, can increase the vessel's service life and reduce the risk of accidents. For future research, several possible directions are outlined, including expanding the model to examine other types of defects and their impact on the service life of sheet structures, improving the method through the development of more precise measurement and analysis techniques, integrating modern technologies such as sensors and artificial intelligence to enhance automation and analysis accuracy, and considering additional factors affecting the service life of ship structures, such as ship speed, weather conditions, water salinity, and more. The overarching goal of these further investigations is to further enhance maritime safety, prolong vessel service life, and optimize resource management.

***Keywords**: service life, sheet structures, automation of analysis, maritime safety, probability wear model, automation method, service life, reliability, faultlessness, technical condition, water transport means, reliability, failure, technical condition, means of water transport.*

УДК 621.391.032.7 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.02

Чередник В.М., Гаценко Л.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ЩОДО МІНІМУМУ ПОХИБКИ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Обґрунтовано подальші шляхи удосконалення системи контролю та діагностування технічного стану радіоелектронних систем засобів водного транспорту під час його експлуатації. Доведено, що існуючі методи і технології, покладені в основу побудови і функціонування засобів технічного контролю та діагностування радіоелектронних систем, відрізняються недостатньою ефективністю. Причиною цього є надважкі умови функціонування засобів водного транспорту, постійно зростаюча складність радіоелектронних систем, які самі та обслуговуючі їх засоби технічного контролю та діагностування використовують аналогові, аналого-цифрові і цифрові сигнали, що не відповідає передовим підходам до побудови сучасних систем і комплексів. Можливими шляхами досягнення необхідних характеристик засобів технічного контролю та діагностування на водному транспорті є отримання та обробка діагностичної інформації від різноманітних аналогових і цифрових радіоелектронних систем, удосконалення принципів функціонування засобів технічного контролю радіоелектронних систем і забезпечення мінімальної похибки відновлення інформації при дискретизації вимірювальних сигналів. Метою роботи є дослідження імітаційної моделі дискретизації вимірювальних сигналів щодо мінімуму похибки відновлення інформації. У роботі проведено дослідження похибок відновлення інформації засобів технічного контролю та діагностування радіоелектронних систем засобів водного транспорту на етапі експлуатації. Доведено, що відмінність частоти дискретизації від оптимальної є причиною втрати інформації про вхідний сигнал. Досліджено частоти дискретизації менші і більші за оптимальну та проаналізовані похибки, причини і обсяги втрати інформації про вхідний сигнал, а також вплив завад у вихідному сигналі.

Ключові слова: дослідження, частота дискретизації, енергозабезпечення, завада, засоби водного транспорту, інформація про вхідний сигнал, похибка, радіоелектронні системи, відновлення інформації, технічний контроль та діагностування

Постановка проблеми. Радіоелектронні системи (РЕС) засобів водного транспорту (ЗВТ) являють собою комплекс складних підсистем, що мають різні призначення елементну базу, відрізняються принципами побудови і модулів і блоків, конструктивними особливостями їх виконання [1 – 3]. Особливу пікантність ситуації придає той факт, що для виконання цільових завдань за призначенням в апаратурі застосовуються як цифрові, так й аналогові сигнали, і відповідні методи обробки інформації. Складність самих РЕС, різнотипність сигналів, що в них обробляються, різні підходи до контролю та діагностування радіоелектронних систем ЗВТ і непрості умови, в яких вони експлуатуються, висувають дуже серйозні вимоги до технічного стану радіоелектронного обладнання ЗВТ. Однією з найважливіших вимог є забезпечення високого рівня надійності РЕС, яка залежить від багатьох чинників. При цьому не останню роль відіграє обґрунтування та забезпечення параметрів контролю та діагностування радіоелектронних

систем ЗВТ [4]. Варто відзначити, що при дискретизації вимірювальних сигналів необхідно домагатися мінімуму похибки відновлення інформації. Це безпосередньо відбивається на обґрунтуванні параметрів контролю та діагностування радіоелектронних систем ЗВТ на етапі експлуатації. Аналого-цифрове перетворення (обробка) сигналів (АЦОС) відіграють дуже значну роль у вимірювальній техніці. Не менше значення ці процеси мають при відновленні сигналів в інформаційно-вимірювальних системах [5]. Тому актуальним науково-технічним завданням є побудова і дослідження імітаційної моделі дискретизації вимірювальних сигналів щодо забезпечення мінімуму похибки відновлення інформації, які дозволять значно спростити конструкцію апаратури контролю й у той самий час забезпечити необхідні технічні показники.

Аналіз літератури. Серед низки заходів, що приймаються для підтримання заданого рівня надійності РЕС ЗВТ й їхнього відновлення при виході з ладу, важлива роль належить застосуванню засобів технічного контролю та діагностування [6 – 11]. За допомогою даних засобів фахівці послідовно виконують такі операції. Якщо у ході контролю технічного стану РЕС ЗВТ виявлена несправність, то її локалізують із точністю до окремого елемента апаратури, а далі відновлюють встановлений рівень надійності.

Але засоби технічного контролю та діагностування РЕС ЗВТ побудовані на різних принципах, і за діагностичну використовують аналогову і цифрову інформацію. Такий стан речей негативно відбивається не тільки на номенклатурі засобів контролю технічного стану окремих РЕС ЗВТ, але й ускладнює побудову самої системи контролю і підтримання потрібного технічного стану РЕС і взагалі значно збільшує вартість експлуатації ЗВТ.

Передові представники суднобудівних та експлуатуючих компаній вже визначили напрямки розвитку засобів технічного контролю та діагностування РЕС і реалізують їх у практичній діяльності [6, 8]. Фахівці вважають за необхідне продовжити удосконалювати існуючі та розробляти нові методи і засоби технічного контролю та діагностування РЕС на всіх етапів їх життєвого циклу. При цьому особливий акцент робиться на широкому впровадженні комп’ютерних технологій і штучного інтелекту. Крім того, підкреслюється, що досягнення інформаційної взаємодії діагностичного (тестового) обладнання різних виробників можливо тільки шляхом забезпечення уніфікації та стандартизації обладнання.

Якість контролю технічного стану багато у чому визначається характеристиками засобів технічного контролю та діагностування РЕС ЗВТ. Насамперед, застосування аналогових, аналогово-цифрових, цифрових сигналів у них є, на наш погляд, основною причиною широкої номенклатура цих систем [1, 6–8]. Відповідно, це відображається на наявності великої кількості різноманітних вимірювальних приладів для контролю діагностичних параметрів у численних контрольних точках радіоелектронної апаратури. Відсутність масового застосування у цих процесах сучасних інформаційних технологій негативно впливають на забезпечення необхідних точності, оперативності й достовірності діагностування. Отже, забезпечення мінімуму похибки відновлення інформації при дискретизації вимірювальних сигналів дозволить підвищити якість контролю та діагностування радіоелектронних систем ЗВТ на етапі експлуатації.

Таким чином, при синтезі засобів контролю технічного стану РЕА ЗВТ необхідно оцінювати похибки вимірювання характеристик електричних сигналів; вплив на них завад; обґрунтувати і дослідити моделі дискретизації вимірювальних сигналів щодо мінімуму похибки відновлення інформації.

Метою роботи є дослідження імітаційної моделі дискретизації вимірювальних сигналів щодо мінімуму похибки відновлення інформації.

Основна частина.

Для вибору частоти дискретизації аналогового сигналу на практиці застосовується теорема Шеннона-Котельникова [12]. Однак між класичною постановкою задачі та її розв’язанням у вимірювальній практиці є суттєві обмеження [13], [14]. Насамперед, це стосується безпосереднього застосування класичних і сучасних методів оптимізації частоти дискретизації аналогових сигналів із забезпеченням мінімуму похибки. Тому необхідно по іншому підходити до постановки задачі оптимізації інтервалу (частоти) дискретизації, що розглядається у цій роботі. Для цього розглянемо узагальнену структурну схему

вимірювального каналу (рис. 1).

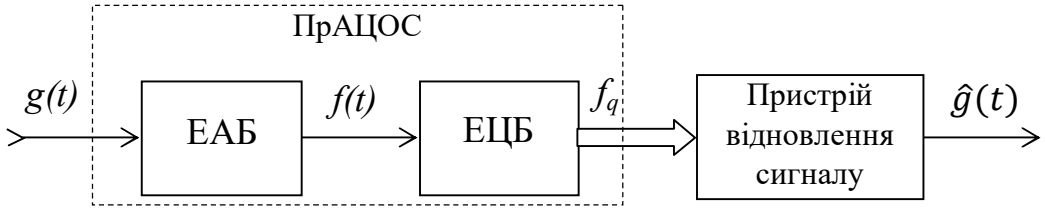


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального каналу
Джерело: розроблено авторами на основі [22], [23]

У пристрою аналого-цифрової обробки (або пристрої АЦОС – ПрАЦОС), згідно з його назвою, здійснюється аналого-цифрове перетворення вхідного сигналу $g(t)$. Структура ПрАЦОС доволі проста: до його складу входять еквівалентний аналоговий (ЕАБ) й еквівалентний цифровий блоки (ЕЦБ), що з'єднані послідовно і виділяються за видом виконуваної над вхідним сигналом операції. Ці виконувані аналогові чи цифрові операції визначають наявність у складі ЕАБ окремих аналогових функціональних блоків й аналогової частини аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Водночас на вхід ЕЦБ надходить сигнал $f(t)$ для дискретизації та квантування з постійним строго заданим інтервалом дискретизації Δt, але цей сигнал може піддатися і цифровій обробці. Після обробки у ЕЦБ сигнали f_q у пристрою відновлення перетворюються на аналоговий сигнал $\hat{g}(t)$. Фактично мова йде про появу зображення вхідного сигналу $g(t)$ з певною похибкою відновлення.

Як відомо, згідно з теоремою Шеннона-Котельникова, високочастотні складові вихідного сигналу відновити неможливо. Тобто, якщо частота прагне до нескінченності, то частотні характеристики ЕАБ зменшуються до нуля. Але також відомо, за будь-якої кінцевої частоти дискретизації точне відновлення сигналу є неможливим. Саме це доведено у [14] для частот, більших за частоти зрізу, частотна характеристика яких строго дорівнює нулю.

Зазвичай для відновлення аналогового сигналу за дискретними точками спочатку відновлюють вихідний сигнал $f(t)$ ЕАБ за дискретним сигналом f_q на виході ЕЦБ, а потім відновлюють вхідний сигнал $g(t)$ ЕАБ за характеристиками його вихідного сигналу $f(t)$ [6]. Таке традиційне перетворення сигналів неминуче веде до виникнення методичної похибки. Її причинами є особливості розв’язання обох задач: для першої – це інтерполяція, а для другої – регуляризація вихідного рівняння

$$\int_{-\infty}^{t} h(t-\tau)\, g(\tau) d\tau = f(t), \qquad (1)$$

де $h(t-\tau)$ – імпульсна перехідна характеристика ЕАБ.

Рівняння (1) має нестійке рішення, де інтервал інтегрування визначається областю існування вхідного сигналу $g(\tau)$ і часу τ. Знаходження наближеного стійкого рішення виразу (1) можливе із застосуванням рівняння Фредгольма першого роду, що передбачає заміну точного оператора h наближеним (регуляризованим) оператором $\hat{h}$ [15].

Пропонується у методі визначення оптимальної частоти дискретизації виключити обидві складові методичної похибки відновлення. Для цього замість рівняння (1) використуємо інше рівняння, що не має, на відміну від виразу (1) нестійкості, але також зв'язує вхідний сигнал $g(\tau)$ ЕАБ із вихідним дискретним сигналом ЕЦБ:

$$\int_{-\infty}^{t_q} h\left(t_q-\tau\right) g(\tau)\, d\tau = f_q, \qquad (2)$$

Де, $f_q \equiv f(t_q)$ – дискретні значення вихідного сигналу $f(t)$ ЕАБ, які отримуються за допомогою АЦП; t_q – моменти дискретизації сигналу $f(t)$.

Відсутність інтерполяції та регуляризації при розв’язанні рівняння (2) усуває причини виникнення методичної похибки і забезпечує спільне врахування властивостей завади у

вихідному сигналі f_q ЕЦБ і частотних властивостей перетворювального оператора. За рахунок цього мінімізується похибка відновлення вхідного сигналу $g(\tau)$ ЕАБ та вдається визначити оптимальну частоту дискретизації [16].

Рівняння (2) характеризується цікавими особливостями. По-перше, воно має стійке рішення навіть за точного задання h, а не наближеного (регуляризованого) оператора $\hat{h}$. По-друге, похибка відновлення вихідного сигналу пропорційна частоті дискретизації вхідного сигналу ЕАБ $f(t)$, і з її збільшенням (рівняння (2) наближається до (1). По-третє, це зменшує стійкість щодо завад у сигналі $f(t)$, що викликає зростання похибки відновлення сигналу $g(\tau)$. Отже, частота дискретизації сигналу фактично є параметром регуляризації. Його значення безпосередньо визначає складову похибки відновлення, на яку впливає завадова складова похибки відновлення (завади дискретизованого сигналу f_q).

Інша складова похибки відновлення вхідного сигналу $g(\tau)$, також пов'язана з частотою його дискретизації, обумовлена тим, що збільшення інтервалу дискретизації Δt сигналу $f(t)$ зменшує кількість ступенів свободи у дискретному сигналі f_q. При відновленні сигналу $g(\tau)$ втрачається інформація про дрібні деталі. Зрозуміло, що ця складова похибки залежить від похибки дискретизації сигналу $g(\tau)$. У методах ступінчастої, лінійної та ін. видів апроксимації аналогового сигналу за його дискретними відліками вигляд апроксимуючої функції задається апріорно [17]. Запропонований метод відрізняється специфічним зв'язком апроксимуючої функції з імпульсною характеристикою ЕАБ. Так, додаткова апріорна інформація про $g(\tau)$ дозволяє зменшити складову цієї похибки. З цього випливає, що друга складова похибки відновлення повністю визначається видом вхідного сигналу $g(\tau)$, частотою дискретизації й імпульсною характеристикою ЕАБ.

Розробимо метод дискретизації сигналів мінімуму похибки відновлення інформації визначення оптимальної частоти дискретизації, який дозволяє виключити складові методичної похибки відновлення інформації.

Вплив частоти дискретизації сигналу $f(t)$ на похибку апроксимації та на завадову складову похибки відновлення сигналу $g(\tau)$ при синтезі ПрАЦОС є різноспрямованим: підвищення частоти дискретизації зменшує похибку апроксимації, і, навпаки, збільшує завадову складову похибки. Відомі передатна функція ЕАБ та статистичні характеристики завади у вихідному сигналі f_q АЦП дозволяють знайти оптимальну частоту дискретизації для кожного класу вхідних сигналів. Для цього застосовують різні критерії: мінімум сумарної похибки відновлення (присутні обидві складові похибки); мінімум однієї складової похибки відновлення при заданому рівні іншої складової похибки; максимум інформації в сигналі $g(\tau)$, яку можна отримати за дискретним сигналом f_q.

Однозначне збільшення похибки відновлення вхідного сигналу $g(\tau)$ викликається завищенням (заниженням) оптимальної частоти дискретизації. Тому визначення оптимальної частоти дискретизації шляхом отримання оцінок обох складових похибки відновлення незалежно від застосовуваного критерію і складає сутність запропонованого методу. Для цього за відомим дискретним сигналом f_q необхідно знайти вхідний сигнал $g(\tau)$, тобто знайти одне рішення рівняння (2) з множини.

Апроксимуючим (скелетним) сигналом називається рішення, що має найменшу норму і не містить апріорної інформації про вхідний сигнал $g(\tau)$.

Апроксимуючий сигнал, незалежно від того, проводиться чи ні відновлення вхідного сигналу $g(\tau)$ за дискретним сигналом f_q, визначає в останньому інформацію про сигнал $g(\tau)$ залежно від частоти дискретизації і дозволяє обґрунтовано визначити її.

Знайдемо регуляризоване рішення рівняння (2), що представляє апроксимуючий сигнал. Для цього позначимо $h(t_q - \tau) = h_q(\tau)$ і розглянемо систему функцій $\{h_q(\tau)\}$ як неортогональний базис у просторі функцій. Тоді величини f_q можна розглядати як проекції вхідного сигналу $g(\tau)$ на підпростір L, "натягнутий" на систему функцій

$$\{h_q(\tau)\}: (g, h_q) = f_q, \tag{3}$$

де $(g, h_q) = \int_{-\infty}^{t_q} h_q(\tau) g(\tau)\, d\tau$ є скалярним добутком сигналу $g(\tau)$ і функції $h_q(\tau)$.

У загальному випадку система функцій $\{h_q(\tau)\}$ не є повною та у просторі вхідних сигналів $g(\tau)$ створює два підпростори: L та його ортогональне доповнення $\bar{L}$. Тоді

$$g(\tau) = g_L(\tau) + \bar{g}_L(\tau),$$

Де, функції $g_L(\tau)$ належать підпростору L, а функції $\bar{g}_L(\tau)$ – підпростору $\bar{L}$ і ортогональній функції $g_L(\tau)$, тобто всім функціям $h_q(\tau)$:

$$(g_L, \bar{g}_L) = 0; \left(\bar{g}_L, h_q\right) = 0.$$

Однозначне визначення функції $g(\tau)$ за рівняннями (2) і (3) неможливі. Причому додавання до функції $g_L(\tau)$ будь-якої функції $\bar{g}_L(\tau)$ із ортогонального доповнення $\bar{L}$ принципово не змінює рівняння.

Отже, рівняння (2) дозволяє визначити лише складову вхідного сигналу $g_L(\tau)$, адля визначення $\bar{g}_L(\tau)$ потрібне залучення апріорної інформації, що відсутня у виразі (2). Відновлення частини втраченої у процесі аналого-цифрового перетворення складової сигналу $\bar{g}_L$ неминуче призведе до підвищення енергії чи потужності сигналу. Очевидно, що розв'язок $g_L(\tau) = g(\tau)$ при $\bar{g}_L(\tau) = 0$ з усіх можливих розв'язків рівнянь (2) або (3) має найменшу норму (енергії чи потужності):

$$\|g(\tau)\|^2 = \|g_L + \bar{g}_L\|^2 = \|g_L\|^2 + \|\bar{g}_L\|^2.$$

Якщо енергія сигналу $g_L(\tau)$ необмежена, під нормою розуміється його середня потужність. Отже, сигнал $g_L(\tau)$ не містить апріорної інформації про вхідний сигнал $g(\tau)$, має мінімальну норму і фактично є апроксимуючим (скелетним) сигналом. Нехай функції $h_q(\tau)$ є лінійно незалежними. Тоді запишемо

$$g_L(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n h_n(\tau), \tag{4}$$

де g_n – коефіцієнти, що не рівні нулю одночасно.

Функція $g_L(\tau)$ апроксимує вхідний сигнал $g(\tau)$. Імпульсні функції $h_n(\tau) = h(t_n - \tau)$ є базисними функціями, які при синтезі апроксимуючого сигналу $g_L(\tau)$, на відміну від відомих методів апроксимації, задаються не апріорно, а безпосередньо пов'язані з властивостями АЦП, які характеризуються його імпульсною характеристикою.

Підставляючи (4) у (3), отримаємо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів g_n

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} k_{qn} g_n = f_q, \tag{5}$$

де

$$k_{qn} = \int_{-\infty}^{\infty} h_q(\tau) h_n(\tau) d\tau = \left(h_q, h_n\right). \tag{6}$$

Детермінант матриці $Det\left\|k_{qn}\right\|$ є визначник Грама системи функцій $h_q(\tau)$ і, якщо вони незалежні, немає нульових власних чисел. Тому розв'язок системи рівнянь (5) для величин g_n є єдиним [18].

Отримаємо його для необмеженого інтервалу часу та рівномірної дискретизації із інтервалом Δt. Матриця k_{qn} має нескінченну розмірність, яка залежить від різниці індексів:

$$k_{qn} = \int_{-\infty}^{\infty} h[(q-n)\Delta t + x]\; h(x) dx = k(q-n). \tag{7}$$

Тому коефіцієнти g_q й апроксимуючий сигнал $g_L(\tau)$ можуть бути знайдені в явній формі за допомогою перетворення Фур'є, в якому f_q – Фур'є-образи дискретного сигналу і g_q – системи коефіцієнтів:

$$\begin{cases} F(\omega) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} f_q e^{-jq\omega\Delta t}; \\ G(\omega) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} g_q e^{-jq\omega\Delta t}. \end{cases} \tag{8}$$

Періодичність функцій $F(\omega)$ і $G(\omega)$ (період $2\pi/\Delta t$) обмежує значення частоти ω інтервалом $-\pi/\Delta t \le \omega \le \pi/\Delta t$.

Зворотні перетворення Фур'є для функцій $F(\omega)$ і $G(\omega)$ у (8) мають вигляд

$$\begin{cases} f_q = \frac{\Delta t}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} F(\omega) e^{jq\omega\Delta t} d\omega\ ; \\ g_q = \frac{\Delta t}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} G(\omega) e^{jq\omega\Delta t} d\omega\ . \end{cases} \tag{9}$$

Після перетворення Фур'є для рівнянь (5) маємо

$$G(\omega) = F(\omega)/\lambda(\omega).$$

де власні значення (спектр) оператора з матричними елементами $k_{qn} = k(q-n)$ дорівнюють

$$\lambda(\omega) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} k(q)e^{-jq\omega\Delta t} = k(0) + 2\sum_{q=1}^{\infty} k(q)\cos q\,\omega\Delta t. \quad (10)$$

Підставляючи рівність для g_q із (9) в (4), знаходимо рішення рівнянь (5):

$$g_L(\tau) = \frac{\Delta t}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{F(\omega)\,\psi\,(\omega,\tau)}{\lambda(\omega)}\,d\omega, \quad (11)$$

де

$$\psi\,(\omega,\tau) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} h(q\Delta t - \tau)\,e^{jq\omega\Delta t}. \quad (12)$$

Система функцій $\psi\,(\omega,\tau)$ утворює ортогональний (але не нормований) базис у просторі L. Можна перетворити вираз (10) до вигляду

$$\lambda(\omega) = \Delta t\int_0^1 |H(\omega,\gamma)\,|^2 d\gamma. \quad (13)$$

Формула (13) має очевидний фізичний зміст: власні значення чи спектр оператора $\hat{k}$ (матриці k_{qn}) виходить усередненням квадрата модуля частотної характеристики $H(\omega,\ \gamma)$ ЕАБ за початковою фазою дискретного сигналу f_q. Це означає, що навіть якщо $H(\omega,\ \gamma)$ має ізольовані нулі, то в спектрі $\lambda(\omega)$ ці нулі усуваються, тобто. скелетний розв'язок $g_L(\tau)$ і в такому разі залишається регулярним.

Отже, отримаємо остаточну формулу для регуляризованого розв'язку рівняння (2):

$$g_L(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} F\,(\omega)e^{jq\omega\Delta t}H^*(\omega,\gamma)\,d\omega\left[\int_0^1 |H(\omega,\gamma)|\,^2 d\gamma\right]^{-1}. \quad (14)$$

Зіставимо отриманий скелетний розв'язок $g_L(\tau)$ з відомими регуляризованими [5]:

$$g_L(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{F\,(\omega)e^{j\omega\tau}H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2+\alpha^2}\,d\omega,$$

де $H(\omega)$ – перетворення Фур'є передатної функції;

α – параметр регуляризації, що здійснює демпфування малих значень частотної характеристики $H(\omega,\ \gamma)$ у сфері високих частот. Для (14) за такий параметр виступає інтервал дискретизації Δt. Демпфування малих значень частотної характеристики ЕАБ у сфері високих частот досягається згортанням спектру в інтервалі періодичності $-\pi/\Delta t < \omega < \pi/\Delta t$, а усунення ізольованих нулів функції $H(\omega)$ – усередненням частотної характеристики $H(\omega,\ \gamma)$ з інтервалу дискретизації Δt.

При заміні інтеграла в (2) сумою за умови, що дискретизації зазнає не тільки вихідний сигнал ЕАБ, але також його вхідний сигнал $g(\tau)$ та передатна функція, розв'язання цієї системи рівнянь має вигляд

$$g(q\Delta t) = g_q = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{F(\omega)e^{jq\omega\Delta t}}{H(\omega)}\,d\omega, \quad (15)$$

де $H(\omega) = H(\omega,0)$.

Для тих самих дискретних точок $\tau = q\Delta t$ скелетний розв'язок (14) дорівнює

$$g_L(q\Delta t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} F(\omega)e^{jq\omega\Delta t}H^*(\omega)d\omega\left[\int_0^1 |H(\omega,\gamma)\,|^2 d\gamma\right]^{-1}. \quad (16)$$

Із зіставлення виразів (15) і (16) витікає, що у розв'язку $g_L(q\Delta t)$ порівняно з $g(q\Delta t)$ усунуті ізольовані нулі частотної характеристики ЕАБ. Тому, якщо, у заваді є складові частоти, які потрапляють на ізольовані нулі функції $H(\omega)$, то рішення (15) буде нестійким, а рішення (16) залишається стійким, тобто різкого наростання завади у скелетному сигналі $g_L(q\Delta t)$ не відбувається. Крім того, усереднення за початковою фазою дискретизації $\gamma = \{\tau/\Delta t\}$ також призводить до зменшення похибки скелетного розв'язання.

Формула (14) дозволяє встановити вигляд рішення також й у проміжних точках залежно від вхідного сигналу $\mathrm{g}(\tau)$. Для цього підставимо до неї рівність (8) для $F(\omega)$

$$g_L(\tau) = \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} L(\tau,\tau')\,g(\tau)\,d\tau, \quad (17)$$

де

$$L(\tau,\tau') = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} H(\omega,\gamma)H^*(\omega,\gamma')e^{(q'-q)\omega\Delta t}d\omega\left[\int_0^1 |H(\omega,\gamma)|^2 d\gamma\right]^{-1}; \quad (18)$$

$$q = \left[\frac{\tau}{\Delta t}\right];\quad q' = \left[\frac{\tau'}{\Delta t}\right];\quad \gamma = \left\{\frac{\tau}{\Delta t}\right\};\quad \gamma' = \left\{\frac{\tau'}{\Delta t}\right\}.$$

Оператор $\hat{L}$ з матричними елементами $L(\tau,\tau')$ є оператором проектування із простору $L+\bar{L}$ на просторі L.

Отримаємо залежність скелетного сигналу $g_L(\tau)$ від вхідного сигналу $g(\tau)$ ЕАБ.

Для окремого випадку, коли імпульсна характеристика $h(\tau)$ ЕАБ мало змінюється в границях інтервалу дискретизації Δt, частотна характеристика $H(\omega,\gamma)$ ЕАБ практично не залежить від γ. Тому із виразу (18) отримаємо

$$L(\tau,\tau') = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} e^{(q'-q)\,\omega\Delta t}d\omega = \frac{1}{\Delta t}\delta_{q'q} = \frac{1}{\Delta t}\begin{cases}1 & \text{at } q'=q;\\ 0 & \text{at } q'\neq q.\end{cases} \qquad (19)$$

Тоді для скелетного розв'язку із виразу (17) на інтервалі $q\Delta t < \tau < (q+1)\Delta t$ маємо

$$g_L(\tau) = \frac{1}{\Delta t}\int_{q\Delta t}^{(q+1)\Delta t} g(\tau')d\tau';\ q\Delta t < \tau < (q+1)\Delta t. \qquad (20)$$

Таким чином, для даного окремого випадку скелетний сигнал $g_L(\tau)$ представляє ступінчасту апроксимацію вхідного сигналу $g(\tau)$, причому значення функції $g_L(\tau)$ на кожному інтервалі дискретизації Δt є середнім значенням сигналу $g(\tau)$ на цьому інтервалі.

Розглянемо загальний випадок, коли імпульсна характеристика $h(\tau)$ ЕАБ може помітно змінюватися в границях інтервалу дискретизації Δt. Тоді значення скелетного сигналу $g_L(\tau)$ є виваженим середнім сигналу $g(\tau)$ не лише з цього, а й за сусідніми інтервалами дискретизації, а вигляд функції впливу визначається імпульсною характеристикою $h(\tau)$.

Отримані розв'язки для апроксимуючого (скелетного) сигналу $g_L(\tau)$ дозволяють знайти вираз для оцінки відносної похибки апроксимації ε_1:

$$\varepsilon_1^2 = \frac{\|g-g_L\|^2}{\|g\|^2}. \qquad (21)$$

При досить великій частоті дискретизації імпульсна характеристика $h(\tau)$ ЕАБ мало змінюється на інтервалі дискретизації Δt, а сигнал $g_L(\tau)$ визначається за формулою (20), і похибка апроксимації є похибкою ступінчастої апроксимації. Якщо у границях кожного інтервалу дискретизації Δt сигнал $\mathrm{g}(\tau)$ змінюється плавно, за умови $g''(\tau) << g'(\tau)$, його можна, розкласти на інтервалах Δt у ряд Тейлора та обмежитися лінійним членом

$$g(\tau) = g(q\Delta t) + g'(q\Delta t)(\tau - q\Delta t);\ q\Delta t < \tau < (q+1)\Delta t. \quad \ldots\ldots \qquad (22)$$

Отже:

$$g_L(\tau) = g(q\Delta t) + g'(q\Delta t)\cdot\Delta t/2. \qquad (23)$$

Співвідношення (22) і (23) дозволяють висловити відносну похибку апроксимації ε_1 у функції інтервалу дискретизації Δt: Для цього обчислимо

$$\varepsilon_1 \approx \Delta t/\theta, \qquad (24)$$

де

$$\theta = \left\{\int_{-\infty}^{\infty}[g'(\tau)]^2\,d\tau/\left[12\int_{-\infty}^{\infty}g^2(\tau)d\tau\right]\right\}^{-1/2}. \qquad (25)$$

Величина θ – характерний час, не залежить від інтервалу дискретизації Δt і характеризує часові властивості вхідного сигналу $g(\tau)$. Чим θ менше, тим швидше і різкіше змінюється сигнал $g(\tau)$.

Наявність у вихідному дискретному сигналі f_q ЕЦБ (або АЦП) завад унеможливлює точне відновлення навіть апроксимуючого сигналу $g_L(\tau)$. Частотні характеристики реальних вимірювальних перетворювачів в ЕАБ зменшуються за досить високих частот. Тоді при переході від дискретного f_q до початкового сигналу $g(\tau)$ відношення сигнал/завада зменшується і для нерегуляризованого рішення може дійти до нуля, навіть при ненульовому відношенні сигнал/завада в аналоговому сигналі $f(t)$. Його Дискретизація аналогового сигналу $f(t)$ регуляризує рішення, тому відношення сигнал/завада у відновленому сигналі $\mathrm{g_L}(\tau)$ не дорівнює нулю.

Доведемо, що це відношення залежить від частоти дискретизації тим більше, чим ця частота є меншою. Знайдемо залежність відношення сигнал/завада у сигналі $g_L(\tau)$ від частоти (інтервалу)

дискретизації при заданому відношенні сигнал/завада в дискретному сигналі f_q. Нехай ξ_l – випадкова похибка (завада) у цьому сигналі. Тоді для випадкової похибки спектра сигналу f_q, відповідно до (8), для $F(\omega)$ маємо

$$\Delta F(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \xi_l e^{-jl\omega\Delta t}.$$

Похибка $\Delta g_L(\tau)$, відповідно до (11), в апроксимуючому сигналі $g_L(\tau)$ дорівнює:

$$\Delta g_L(\tau) = \frac{\Delta t}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{\Delta F(\omega)\cdot\psi\,(\omega\,,\tau)}{\lambda(\omega)}\, d\omega.$$

Отримаємо вираз відносної дисперсії випадкової похибки ε_2^2, тобто для відношення потужності завади $\|\Delta g_L\|^2$ до потужності сигналу $\|g_L(\tau)\|^2$:

$$\varepsilon_2^2 = \frac{\|\Delta g_L(\tau)\|^2}{\|g_L(\tau)\|^2} = \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{S(\omega)}{\lambda(\omega)} d\omega \left[\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{S_0(\omega)}{\lambda(\omega)} d\omega\right]^{-1}, \quad (26)$$

де $S(\omega)$ – спектральна щільність потужності завади ξ_l у дискретній формі сигналу f_q;

$S_0(\omega)$ – спектральна щільність потужності сигналу f_q.

У найбільш несприятливому випадку, коли спектр завад у сигналі f_q зосереджений поблизу меншого значення $\lambda(\omega)$, яке дорівнює λ_{min}, а спектр сигналу f_q – поблизу більшого значення $S(\omega)$, яке дорівнює λ_{max}, отримаємо

$$\varepsilon_2' = \sqrt{\lambda_{max}/\lambda_{min}}\,\sqrt{P/P_0}\,, \quad (27)$$

де $P = \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} S(\omega) d\omega$ – потужність завади ξ_l в сигналі f_q;

$P_0 = \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} S_0(\omega) d\omega$ – потужність сигналу f_q.

Якщо завада ξ_l рівномірно розподілена за спектром дискретного сигналу f_q у границях $(-\pi/\Delta t\,,\ \pi/\Delta t)$, то виходить менше значення похибки

$$\varepsilon_2'' = [\lambda_{max}\left(\frac{1}{\lambda}\right)_m]^{1/2}\sqrt{P/P_0}, \quad (28)$$

де

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)_m = \frac{\Delta t}{2\pi}\int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{d\omega}{\lambda(\omega)}.$$

Величина P_0/P є відношення сигнал/завада на виході ЕЦП (або АЦП), а величини $(\varepsilon_2')^2$, $(\varepsilon_2'')^2$ – відношення сигнал/завада у відновленому скелетному сигналі $g_L(\tau)$. Тому коефіцієнт генерації шуму k_n, який дорівнює відношенню сигнал/завада скелетного сигналу $g_L(\tau)$, у більш негативному випадку визначається співвідношенням

$$k_n' = \lambda_{max}/\lambda_{min}, \quad (29)$$

а при рівномірному розподілі завади за спектром сигналу f_q, згідно співвідношенню (28):

$$k_n'' = \lambda(1/\lambda)_{m_{max}}. \quad (30)$$

Похибки ε_2' і ε_2'' пов'язані з коефіцієнтами генерації шуму k_n' і k_n'' співвідношеннями

$$\varepsilon_2' = \sqrt{k_n'}\cdot\eta;\ \ \varepsilon_2'' = \sqrt{k_n''}\cdot\eta, \quad (31)$$

де $\eta^2 = P/P_0$ – відносна потужність завади у дискретному сигналі f_q, тобто відношення завада/сигнал на виході ЕЦП (або АЦП).

Для фіксованого вхідного сигналу $g(\tau)$ відносна похибка апроксимації ε_1 є систематичною, а величина ε_2^2 – відносною дисперсією випадкової похибки.

Співвідношення (29-31) визначають відносну похибку у відновленому вхідному сигналі $\hat{g}(\tau)$, обумовлену випадковою похибкою (завадою) у вихідному дискретному сигналі f_q ЕЦБ залежно від значення інтервалу дискретизації та вигляду імпульсної характеристики ЕАБ. Разом з формулами (21), (24) для відносної похибки апроксимації вони дозволяють обґрунтовано визначити оптимальний інтервал (частоту) дискретизації. Оскільки зі збільшенням інтервалу дискретизації відносна похибка зростає, такий оптимум існує. У простішому випадку оптимальне значення інтервалу дискретизації Δt можна знайти з умови $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ або з умови мінімуму сумарної похибки.

Проілюструємо запропонований метод визначення оптимального інтервалу (частоти) дискретизації на найпростішому прикладі, в якому розрахунки знайдені аналітично.

Нехай ЕАБ є простою аперіодичною ланкою із імпульсною характеристикою

$$h(\tau) = \begin{cases} \alpha e^{-\alpha\tau}, & \tau > 0; \\ 0 \quad\quad , & \tau < 0, \end{cases} \tag{32}$$

де α^{-1} – постійна часу ланки.

Обчислимо частотну характеристику $H(\omega, \gamma)$ ЕАБ:

$$H(\omega, \gamma) = \alpha \sum_{i=1}^{\infty} e^{-\alpha[(i-\gamma)\Delta t] - ji\omega\Delta t} = e^{\alpha\gamma\Delta t} H(\omega), \tag{33}$$

де

$$H(\omega) = \alpha \sum_{i=1}^{\infty} e^{-(\alpha + j\omega)i\Delta t} = \alpha \left[e^{(\alpha+j\omega)\Delta t} - 1\right]^{-1}.$$

Функція $H(\omega)$ не залежить від дрібної частини $\gamma = \{\tau/\Delta t\}$, тому

$$\int_0^1 |H(\omega, \gamma)|^2 d\gamma = b(\alpha)\, |H(\omega)|^2, \tag{34}$$

де $b(\alpha) = \int_0^1 e^{2\alpha\gamma\Delta t} d\gamma = \frac{1}{2\alpha\Delta t}(e^{2\alpha\Delta t} - 1)$ – числовий коефіцієнт.

Після підстановки виразів (33), (34) у формулу (14), знаходимо апроксимуючий (скелетний) сигнал

$$g_L(\tau) = \frac{e^{\alpha\gamma\Delta t}}{2\pi\alpha b(\alpha)} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} F(\omega) e^{jq\omega\Delta t} \left[e^{(\alpha+j\omega)\Delta t} - 1\right] d\omega.$$

Після підстановки в цю формулу виразу (8) для $F(\omega)$ остаточно маємо

$$g_L(\tau) = \frac{2e^{\alpha\gamma\Delta t}}{e^{\alpha\Delta t} - 1}\left(e^{\alpha\Delta t} f_{q+1} - f_q\right).$$

Сигнал $g_L(\tau)$ є ступінчастою кривою, промодульованою множником $exp[\,\alpha\{\tau/\Delta t\}\Delta t]$. Якщо $\alpha\Delta t << 1$, то модуляція зникає та сигнал наближається до ступінчастої кривої $g_L(\alpha) = \frac{1}{2\alpha\Delta t}\left(f_{q+1} - f_q\right)$.

Із співвідношення (13) знаходимо

$$\lambda(\omega) = b(\alpha)\Delta t |H(\omega)|^2 = \alpha^2 \Delta t b(\alpha)\, (e^{2\alpha\Delta t} + 1 - 2e^{\alpha\Delta t} \cos\omega\,\Delta t)^{-1}.$$

Отже, отримаємо такі співвідношення:

$$\lambda 2(e^{\alpha\Delta t} - 1)^{-2}{}_{max}; \quad \lambda 2(e^{\alpha\Delta t} + 1)^{-2}{}_{min}; \quad (1/\lambda)_m = \frac{1}{\alpha^2 \Delta t b(\alpha)}(e^{2\alpha\Delta t} + 1).$$

Із виразів (29), (30) розраховано коефіцієнти генерації шуму:

$$k_n' = (e^{\alpha\Delta t} + 1)^2 (e^{\alpha\Delta t} - 1)^{-2}; \quad k_n'' = (e^{2\alpha\Delta t} + 1)\,(e^{\alpha\Delta t} - 1)^{-2}.$$

Визначення оптимального інтервалу дискретизації Δt_o для простої умови $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ і найбільш несприятливої, зосередженої завади призводить до рівняння

$$\frac{\Delta t_o}{\theta} = \frac{e^{\alpha\Delta t_o} + 1}{e^{\alpha\Delta t_o} - 1}\sigma,$$

де σ – відносне середнє значення завади.

Якщо $\zeta = \alpha\Delta t_o$ і $\beta = \alpha\theta\sigma$, то попередній вираз перетворимо до вигляду

$$\zeta = \beta \frac{e^{\zeta} + 1}{e^{\zeta} - 1}. \tag{35}$$

Аналогічно при рівномірному розподілі завади у вихідному сигналі f_q ЕЦБ за його спектром для оптимального інтервалу дискретизації Δt_o отримаємо рівняння

$$\frac{\Delta t_o}{\theta} = \frac{\sqrt{e^{2\alpha\Delta t_o} + 1}}{e^{\alpha\Delta t_o} - 1}\sigma.$$

У тих же безрозмірних змінних – це рівняння набуває вигляду

$$\zeta = \beta \frac{\sqrt{e^{2\zeta} + 1}}{e^{\zeta} - 1}. \tag{36}$$

На рисунку 1 наведено графіки залежності розв'язку $\zeta = \alpha\Delta t_o$ від параметру $\beta = \alpha\theta\sigma$ за умови $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$: крива 1 для рівняння (35) – зосереджена за частотою завада та крива 2 для рівняння (36) – рівномірно розподілена завада за спектром вихідного сигналу f_q ЕЦБ, а також залежності рішень $\zeta = \alpha\Delta t_o$ від параметру $\beta = \alpha\theta\sigma$, визначені найменше сумарної відносної

похибки відновлення $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, для зосередженої завади (крива 3) та рівномірно розподіленої завади за спектром вихідного сигналу f_q ЕЦБ (крива 4).

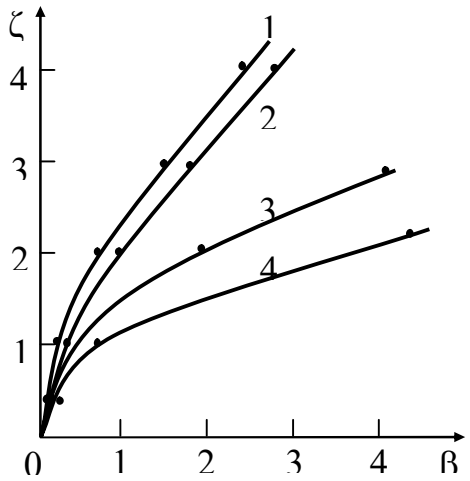


Рисунок 1 – Графіки залежностей безрозмірної змінної ζ від параметра β для різних видів завад
Джерело: розроблено авторами

На рисунку 2 наведено залежності нормованої похибки ε/σ від величини ζ, причому нумерація кривих відповідає тим самим чотирьом варіантам, за якими побудовані криві на рисунку 1 шляхом моделювання [19], [20].

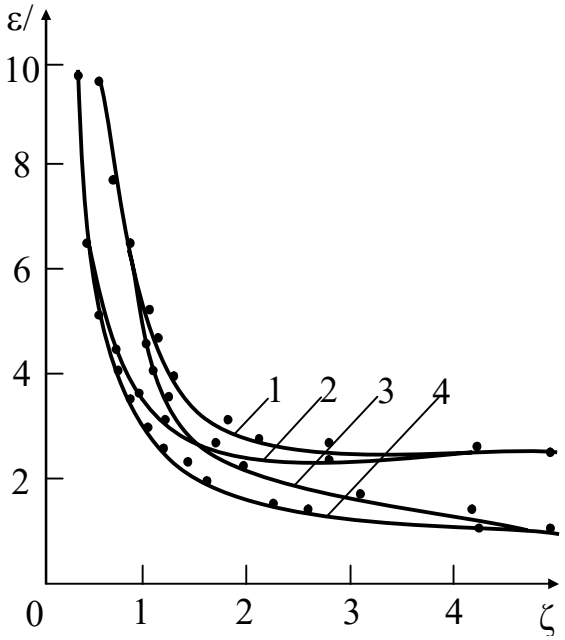


Рисунок 2 – Графіки залежності випадкової похибки дискретизації ε/σ від ζ для різних видів завад

Джерело: розроблено авторами на основі аналізу [19], [20]

Оскільки $\alpha\Delta t_o << 1$, то при відновленні вхідного сигналу $g(\tau)$ відбувається посилення завади та відновлення виявляється можливим лише за досить малого рівня завади ξ у вихідному сигналі f_q ЕЦБ. При цьому відбувається відновлення деталей сигналу $g(\tau)$ на інтервалах

дискретизації Δt_o, значно менших інтервалу усереднення α імпульсної властивості ЕАБ, тобто відбувається «максимальний роздільний ефект». При $\alpha\Delta t_0 >> 1$ як із рівняння (35), так і із рівняння (36) маємо $\Delta t_0 \approx \sigma\theta$; $\sigma\theta\alpha >> 1$.

У цьому випадку $\varepsilon_1 = \varepsilon_2' = \varepsilon_2'' = \sigma$ не відбувається посилення завади при відновленні сигналу $g(\tau)$.

Для завад, зосереджених та рівномірно розподілених за спектром вихідного сигналу f_q ЕЦБ, з рівнянь (35) та (36) отримаємо залежності між завадової складової похибки та похибкою апроксимації:

$$\varepsilon_2' = \sigma\frac{e^{\alpha\theta\varepsilon_1}+1}{e^{\alpha\theta\varepsilon_1}-1}; \quad (37)$$

$$\varepsilon_2'' = \sigma\frac{\sqrt{e^{2\alpha\theta\varepsilon_1}+1}}{e^{\alpha\theta\varepsilon_1}-1}. \quad (38)$$

З формул (37), (38) видно, що прагнення зменшити одну зі складових похибки відновлення призводить до збільшення іншої її складової. Так, у галузі "роздільності сигналів" (при $\alpha\theta\varepsilon_1 << 1$) маємо:

$$\varepsilon_2' \approx 2\sigma/(\alpha\theta\varepsilon_1); \varepsilon_2'' \approx \sqrt{2}\sigma/(\alpha\theta\varepsilon_1).$$

Оптимальна частота (або інтервал) дискретизації при аналого-цифровій обробці сигналів безпосередньо пов'язана, по-перше, з часовою характеристикою θ вхідного сигналу $g(\tau)$ ЕАБ, що визначається співвідношенням (25). По-друге, з імпульсною чи частотною характеристиками ЕАБ. І, по-третє, із рівнем завади у вихідному сигналі ЕЦБ (чи АЦП), тобто з усіма параметрами та характеристиками власне вимірювального каналу (або ПрАЦОС).

Для визначення оптимального інтервалу дискретизації Δt_0 немає необхідності проводити фактичне відновлення вхідного сигналу $g(\tau)$, хоча воно може бути виконано з допомогою формули (14). За наявності апріорної інформації про вхідний сигнал $g(\tau)$ апроксимуючий сигнал $g_L(\tau)$ може бути доповнений ортогональним до нього сигналом $\bar{g}_L(\tau)$, щоб врахувати таку інформацію. Необхідно лише мати на увазі, що при цьому потужність вхідного сигналу $g(\tau)$ збільшується. Практично для визначення Δt_0 достатньо знання характерного часу θ вхідного сигналу, відносної дисперсії завади σ^2 у вихідному сигналі АЦП та частотного спектру $\lambda(\omega)$, що визначається згідно (13), або в найбільш несприятливому випадку зосередженої за частотою завади знання відношення λmin_{max}. Це дозволяє визначити обидві складові похибки, що впливають на вибір частоти дискретизації, – похибку апроксимації ε_1 та завадову складову похибки ε_2 у функції інтервалу дискретизації Δt. Потім, використовуючи один із критеріїв оптимальності, знаходять оптимальний інтервал (або частоту) дискретизації Δt_0. У розглянутому прикладі критерій рівності складових похибки та критерій мінімуму сумарної похибки призводять до близьких значень оптимального інтервалу дискретизації. Очевидно, це має місце й у загальному випадку.

Висновки. Доведено, що на технічний стан радіоелектронних систем засобів водного транспорту впливає частота дискретизації оброблюваних аналогових сигналів. Проведено дослідження похибок вимірювання характеристик електричних сигналів радіоелектронних систем засобів водного транспорту.

Таким чином, відмінність частоти дискретизації від оптимальної є причиною проблем при технічній реалізації пристрою. Якщо частота дискретизації менша за оптимальну, то збільшується похибка і втрачається частина інформації про вхідний сигнал ПрАЦОС. Якщо частота дискретизації більша за оптимальну, то у загальному випадку це не збільшує інформації про вхідний сигнал, а й за необхідності його відновлення – зменшує її через більш сильний вплив завад у вихідному сигналі.

Запропонований у роботі метод дискретизації сигналів за мінімумом похибки відновлення інформації для визначення оптимальної частоти дискретизації дозволяє вирішити зазначену суперечність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gini F. Grand Challenges in Radar Signal Processing // Front. Sig. Proc. 1:664232. – 2021. – https://doi.org/10.3389/frsip.2021.664232.

2. Zhu X., Mou L., Zhang L. et al. Deep learning in remote sensing: a comprehensive review and list of resources // IEEE Geosci, Remote Sens. Mag. – 2017. – № 5 (4). – Pp. 8-36. – https://doi.org/10.1109/mgrs.2017.2762307.

3. Герасимов С.В., Гаценко Л.В. Метод повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры средств водного транспорта при эксплуатации по техническому состоянию // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri (Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy). – № 1. – 2021. – С. 118-126.

4. Герасимов С.В., Куценко В.В., Борисенко М.В. Синтез вимірювального сигналу для оцінки технічного стану радіотехнічних систем // The X-th International scientific and practical conference «Modern approaches to the introduction of science into practice». – San Francisco, USA. – 2020. – С. 237-241.

5. Laptiev O., Yevseiev S., Hatsenko L., Daki O., Ivanenko V., Fedunov V., Hohoniants S. The method of discretization signals to minimize the fallibility of information recovery // International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). – Vol. 13. – No 3 (2021). – Pp. 340-348. https://doi.org/10.54039/ijcnis.v13i3.5070.

6. Герасимов С.В., Гаценко Л.В. Моделювання генерації сигналів спеціальної форми для контролю технічного стану радіоелектронного обладнання // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022). – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 2. – С. 176.

7. Artikula A., Britov D., Dzhus V. et al. Measurement errors affecting the characteristics of multi-position systems and ways to reduce them // InterConf. – 2021. – Pp. 333-346. – https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.06.2021.035.

8. Herasymov S., Soroka V., Milevskyi S. et al. Development of a Method for Digital Synthesis of Electrical Signals with a Normalized Harmonic Coefficient // 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). – 2023. – Pp. 1-5. – https://doi.org/10.1109/HORA58378.2023.10156678.

9. Hatsenko L., Kyrychenko D., Yakovlev M. Investigation of the Influence of Random Interferences on the Error with Frequency Conversion Electrical Signals Information Systems Power Supply // IEEE Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – 2022. – Pp. 573-577.

10. Hatsenko L., Herasimov S., Pohasii S. Investigation of the Effect of Harmonic Interference on the Error with Frequency Conversion of Energy Supply Systems on Water Transport Vehicles // CPITS-II-2021: Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems. – 2021. – Pp. 237-243.

11. Hatsenko L., Lutsenko A., Skopintsev O., Pohasii S. Investigation of Measurement Errors of Electrical Signals Characteristics of Energy Supply Systems // ISIT Short Paper Proceedings of the 2nd International Conference on Intellectual Systems and Information Technologies. – 2021. – Pp. 184-191.

12. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений / Пухов Г.Е. – К.: Наукова думка, 1980. – 419 с.

13. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований / Г.Е. Пухов. – К.: Наукова думка, 1988. – 216 с.

14. IMO, SN/Circ. 213. – Guidance on Chart Datum and Accuracy of Positions on Charts. – 31 May, 2000.

15. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели / Г.Е. Пухов. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.

16. Герасимов С.В., Гаценко Л.В., Кукобко С.В. Обґрунтування вимог до системи

контролю технічного стану радіоелектронних систем // XXI науково-технічна конференція «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах». – Чернігів: ДНДІ ВіС ОВТ. – 2021. – С. 61.

17. Чинков В.М. Дослідження та обґрунтування критеріїв оптимізації вимірювальних сигналів для контролю технічного стану систем автоматичного управління / В.М. Чинков, С.В. Герасимов // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 4. С. 43-47.

18. Величко О.М. Основи метрології та метрологічна діяльність / Величко О.М., Коцюба А.М., Новиков В.М. – К: Техніка, 2000. – 228 с.

19. Чарльз Калверт. Delphi 5. Енциклопедия пользователя / Чарльз Калверт. – Киев: Изд. ДиаСофт Лтд. – 1996. – 736 с.

20. The Math Works – MATLAB and Simulink for Technical Computing // [електронний ресурс] – Режим доступа: http http://www.mathworks.com.

REFERENTS

1. Gini F. (2021) Grand Challenges in Radar Signal Processing. *Front. Sig. Proc. 1:664232*. https://doi.org/10.3389/frsip.2021.664232.

2. Zhu X., Mou L., Zhang L. et al. (2017) Deep learning in remote sensing: a comprehensive review and list of resources. *IEEE Geosci, Remote Sens. Mag*. № 5 (4). Pp. 8-36. https://doi.org/10.1109/mgrs.2017.2762307.

3. Herasimov S., Hatsenko L. (2021) Method for increasing the reliability of radio-electronic equipment of water transport means during operation according to technical condition. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. № 1. Pp. 118-126.

4. Herasimov S., Kutsenko V., Borysenko M. (2020) Synthesis of the measuring signal for assessing the technical condition of radio engineering systems. *The X-th International scientific and practical conference «Modern approaches to the introduction of science into practice»*. San Francisco, USA. Pp. 237-241.

5. Laptiev O., Yevseiev S., Hatsenko L., Daki O., Ivanenko V., Fedunov V., Hohoniants S. The method of discretization signals to minimize the fallibility of information recovery // *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS).* – Vol. 13. – No 3 (2021). – Pp. 340-348. https://doi.org/10.54039/ijcnis.v13i3.5070.

6. Herasimov S., Hatsenko L. (2022) Modeling of the generation of signals of a special form for monitoring the technical condition of radio-electronic equipment. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022)*. Vol. 2. P. 176.

7. Artikula A., Britov D., Dzhus V. et al. (2021) Measurement errors affecting the characteristics of multi-position systems and ways to reduce them. *InterConf.* Pp. 333-346. https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.06.2021.035.

8. Herasymov S., Soroka V., Milevskyi S. et al. (2023) Development of a Method for Digital Synthesis of Electrical Signals with a Normalized Harmonic Coefficient. *5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. Pp. 1-5. https://doi.org/10.1109/HORA58378.2023.10156678.

9. Hatsenko L., Kyrychenko D., Yakovlev M. (2022) Investigation of the Influence of Random Interferences on the Error with Frequency Conversion Electrical Signals Information Systems Power Supply. *IEEE Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Pp. 573-577.

10. Hatsenko L., Herasimov S., Pohasii S. (2021) Investigation of the Effect of Harmonic Interference on the Error with Frequency Conversion of Energy Supply Systems on Water Transport Vehicles. *CPITS-II-2021: Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*. Pp. 237-243.

11. Hatsenko L., Lutsenko A., Skopintsev O., Pohasii S. (2021) Investigation of Measurement Errors of Electrical Signals Characteristics of Energy Supply Systems. *ISIT Short Paper Proceedings*

of the 2nd International Conference on Intellectual Systems and Information Technologies. Pp. 184-191.

12. Pukhov G.E. Differential transformations of functions and equations / Pukhov G.E. – K.: Naukova Dumka, 1980. – 419 p.

13. Pukhov, G.E. Approximate methods of mathematical modelling based on the application of differential T-transformations / G.E. Pukhov. – K.: Naukova Dumka, 1988. – 216 p.

14. IMO, SN/Circ. 213. – Guidance on Chart Datum and Accuracy of Positions on Charts. – 31 May, 2000.

15. 24. Pukhov G.E. Differential spectra and models / G.E. Pukhov. – K.: Naukova Dumka, 1990. – 184 p.

16. Gerasymov S.V., Gatsenko L.V., Kukobko S.V. Substantiation of requirements for the system of control of the technical condition of radio electronic systems // *XXI Scientific and Technical Conference "Creation and Modernisation of Weapons and Military Equipment in Modern Conditions."* – Chernihiv: SRI VIS OVT. – 2021. – P. 61.

17. Chinkov V.M. Research and substantiation of criteria for optimizing measurement signals for monitoring the technical condition of automatic control systems / V.M. Chinkov, S.V. Gerasimov // *Ukrainian Metrological Journal*. 2013. – No. 4. P. 43-47.

18. Velychko O.M. Fundamentals of metrology and metrological activity / Velychko O.M., Kotsiuba A.M., Novikov V.M. – K :Technika, 2000. – 228 p.

19. Charles Calvert. Delphi 5. User's encyclopedia / Charles Calvert – Kyiv: DiaSoft Ltd. DiaSoft Ltd. – 1996. – 736 p.

20. The Math Works – MATLAB and Simulink for Technical Computing // [electronic resource] – Access mode: http http://www.mathworks.com.

Cherednuk V.M., Hatsenko L V.

INVESTIGATION OF THE SIMULATION MODEL OF MEASUREMENT SIGNALS SAMPLING WITH RESPECT TO THE MINIMUM ERROR OF INFORMATION RECOVERY

Further ways of improving the system of control and diagnostics of the technical condition of radio electronic systems of water transport means during its operation are substantiated. It is proved that the existing methods and technologies underlying the construction and operation of technical control and diagnostics of radio electronic systems are not very effective. The reason for this is the extremely difficult conditions of functioning of water transport means, the ever-increasing complexity of radio electronic systems, which themselves and the technical control and diagnostic means serving them use analogue, analogue-digital and digital signals, which does not correspond to advanced approaches to the construction of modern systems and complexes. Possible ways to achieve the required characteristics of technical control and diagnostic means in water transport are to obtain and process diagnostic information from various analogue and digital radio electronic systems, improve the principles of functioning of technical control means of radio electronic systems and ensure minimal error in information recovery when sampling measurement signals. The aim of the work is to study the simulation model of measurement signal sampling with respect to the minimum information recovery error. The paper investigates the errors of information recovery of technical control and diagnostics of radio electronic systems of water transport means at the stage of operation. It is proved that the difference in the sampling rate from the optimal one causes the loss of information about the input signal. The sampling rates less and more than the optimal one is investigated and the errors, causes and volumes of loss of information about the input signal, as well as the influence of interference in the output signal are analysed.

***Keywords**: research, sampling rate, power supply, interference, water transport means, information about the input signal, error, radio electronic systems, information recovery, technical control and diagnostics*

УДК 629.5.078:656.075 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03

Головань А.І.

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

У статті розглянуто важливу проблему вдосконалення систем технічного обслуговування вантажних суден. Аналізуються останні дослідження і публікації в цій області, які вказують на необхідність моніторингу ефективності системи технічного обслуговування та використання інформаційно-комунікаційних технологій для покращення обслуговування суден.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування методики моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Завданням статті є розробка загальної методики моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування в складі інтелектуального управління параметрами системи технічного обслуговування на основі аналітичного центру ShipDiMRO. Також розглядаються структури систем моніторингу експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування для суден, які обладнані або не обладнані вбудованою мережею CANopen.

Ця дослідницька робота спрямована на вдосконалення систем технічного обслуговування вантажних суден шляхом впровадження моніторингу, що дозволить ефективно контролювати технічний стан суден, планувати обслуговування та вчасно виявляти несправності.

Результати статті включають описану методику моделювання, структури систем моніторингу та рекомендації щодо впровадження моніторингу ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Висновки підкреслюють важливість використання інформаційно-комунікаційних технологій, аналізу експлуатаційних даних та різних підходів до вимірювання продуктивності для забезпечення надійності і ефективності технічного обслуговування. Метод дослідження базується на аналізі інформаційних потоків та використанні інформаційно-комунікаційних технологій для забезпечення надійного моніторингу та контролю ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

***Ключові слова**: моніторинг, технічне обслуговування, вантажні судна, ефективність, інформаційні технології, аналіз даних.*

Постановка проблеми. Сучасні вантажні судна вимагають систем, які дозволили б контролювати технічний стан та різні показники ефективності в режимі реального часу. Постійна взаємодія інфраструктури водних шляхів та суден, що рухаються в транспортних потоках, створює необхідність для точної ідентифікації та моніторингу цих суден. Зазначені обставини формують запит практики у створенні системи, яка забезпечуватиме збір, аналіз та передачу даних про технічний стан суден, включаючи інформацію про експлуатаційні характеристики та параметри системи технічного обслуговування.

Головною проблемою, яка висвітлюється в статті, є необхідність створення і впровадження єдиної системи моніторингу для вантажних суден з метою забезпечення постійного контролю за різними показниками ефективності системи технічного

обслуговування. Відправною точкою є вплив ефективності технічного обслуговування на надійність та безпеку судноплавства.

Проблема полягає у відсутності однієї єдиної системи моніторингу, яка об'єднувала б всі ці аспекти та дозволила б вирішити їх в комплексі. Створення такої системи є актуальним завданням, оскільки воно допоможе підвищити надійність та безпеку судноплавства та зменшити ризики збоїв у технічному стані суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В цілому, аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість впровадження моніторингу ефективності систем технічного обслуговування. Важливими постають питання: застосування концепцій електронного обслуговування при розробці системи вимірювання ефективності технічного обслуговування [1]; представлення методу вимірювання ефективності технічного обслуговування за допомогою аналізу експлуатаційних даних, який включає оцінку впливу на навколишнє середовище та аналіз подій ремонту/обслуговування [2]; дослідження моніторингу ефективності управління в режимі реального часу як інструменту для віддаленого технічного обслуговування [3]; впровадження різних підходів до вимірювання ефективності технічного обслуговування, включаючи вартісні показники, збалансовану систему показників, системний аудит і аналіз оболонки даних [4]. Найпоширенішими методами, що використовуються для моніторингу, є комплексний підхід, загальна ефективність обладнання та система збалансованих показників [5]. Системи вимірювання ефективності мають вирішальне значення для тих, хто зацікавлений в технічному обслуговуванні, щоб гарантувати, що вони не суперечать загальним потребам бізнесу [6]. Комплексний метод оцінки технічного обслуговування все ще не винайдено [7]. Надійна звітність про продуктивність незамінна для управління технічним обслуговуванням [8]. Відсутність показників ефективності ускладнює планування, контроль і вдосконалення процесу технічного обслуговування [9].

Всі ці дослідження разом підкреслюють важливість використання інформаційно-комунікаційних технологій, аналізу експлуатаційних даних і розгляду різних підходів до вимірювання продуктивності для ефективного моніторингу роботи системи технічного обслуговування.

Мета дослідження полягає в розробці та обґрунтуванні методики моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

Основні результати дослідження. Управління параметрами системи технічного обслуговування будь-яких транспортних засобів можливо досягти за умови наявності комплексного підходу та використання передових цифрових технологій. Для досягнення оптимальної ефективності системи ТО у аналітичному центрі ShipDiMRO реалізовано такі процеси: інтеграція даних, моніторинг в реальному часі, аналітика та прогнозування, віддалене управління, структурування документації, участь екіпажу.

У процесі інтеграції даних забезпечується надходження інформації з різних джерел, включаючи сенсори, моніторингові системи, дистанційне зондування тощо, для забезпечення повної картини стану транспортного засобу.

У процесі моніторингу в реальному часі здійснюється постійний моніторинг параметрів судна, що дозволяє оперативно виявляти будь-які аномалії та вживати негайні заходи.

У процесі аналітики та прогнозування використовуються аналітичні методи та методи штучного інтелекту для обробки великих обсягів даних, а також для прогнозування змін у стані судна.

У процесі віддаленого управління забезпечується можливість віддаленого керування параметрами системи ТО та внесення коригувань для оптимізації роботи безпосередньо в експлуатації.

В процесі структурування документації забезпечується ведення актуальної та структурованої документації щодо історії обслуговування та ремонтів, що сприяє відслідковуванню та аналізу попередніх впливів.

Процес участі екіпажу визначає важливість навчання та підготовки екіпажу щодо користування технічними засобами системи ТО та швидкого реагування на проблеми, що виникли.

Тільки за умови такого комплексного підходу та інтеграції передових технологій системи ТО можна досягти високої ефективності та надійності транспортних засобів.

Забезпечення єдиного підходу до моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО базуючись на яких виконується аналіз показників ефективності системи ТО в умовах інтелектуальних транспортних систем була розроблена загальна методика побудови та структури системи моніторингу показників ефективності системи ТО вантажного судна, включаючи інтелектуальне управління параметрами системи технічного обслуговування. Для створення комплексної системи, яка гарантує підвищення ефективності системи технічного обслуговування, були визначені принципи та запропонована методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО в контексті інтелектуального управління параметрами системи технічного обслуговування на основі аналітичного центру ShipDiMRO (рис. 1) по аналогії із методикою створення автоматизованого бортового комплексу ACMS [10, 11, 12].

У процесі розробки інтелектуального комплексу управління параметрами системи ТО, інтеграції та уніфікації загального підходу до створення інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО вантажних суден в умовах інтелектуальних транспортних систем, для формування структури аналітичного центру ShipDiMRO з урахуванням його функціональних можливостей, аналогічно було проведено аналіз, узагальнення та порівняння існуючих даних з використання інтелектуальних транспортних систем у морському транспорті, з урахуванням важливості їх впровадження в сфері вантажних суден і загальної системи водного транспорту.

Для цієї мети була вирішена системна задача, яка полягала у розробці аргументованих стратегій для створення систем моніторингу вантажних суден з метою збору інформації про системи ТО окремих вантажних суден, що експлуатуються як в Україні, так і у різних частинах світу.

Основна концепція інтелектуального управління параметрами системи ТО вантажних суден полягає в його здатності постійно контролювати характеристики системи ТО, показники ефективності системи ТО, дії екіпажу, умови технічного використання судна, а також допомагати екіпажу найбільш ефективно та безпечно виконувати технічну експлуатацію суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, зокрема в умовах максимальної складності.

Запропонована концепція передбачає наявність додаткового інтегрованого системного рішення, яке може функціонувати як комплексний помічник, визнаний також як "віртуальний екіпаж: ефективність ТО". Відзначено, що цей елемент віртуального екіпажу сприяє ефективному та безпечному обслуговуванню суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів навіть в найбільш вимогливих ситуаціях [13]. До того ж, важливо враховувати, що вантажні судна постійно перебувають в активному взаємодії з навколишнім середовищем, водними шляхами та іншими суднами, що також пересуваються в межах транспортних потоків. У цьому контексті надзвичайно важливо, що вантажні судна здатні точно ідентифікуватися з боку інфраструктури водних шляхів і приймати активну участь у системі моніторингу технічних параметрів та характеристик. Ця інформація відіграє критичну роль у забезпеченні ефективної координації руху суден та виконанні вимог міжнародного законодавства [14].

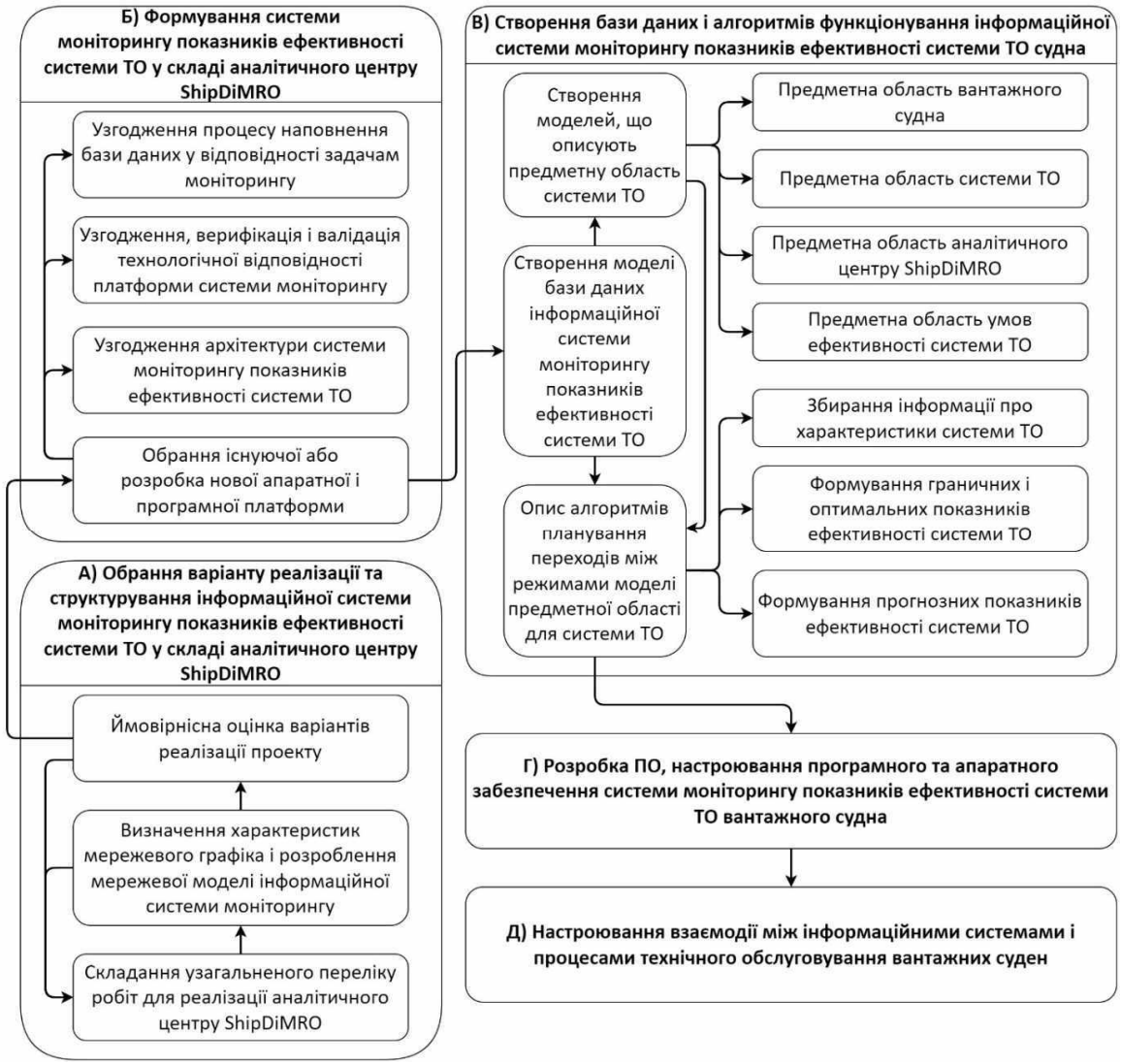


Рисунок 1 – Загальна методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО у складі інтелектуального управління параметрами системи ТО на основі аналітичного центру ShipDiMRO

З метою впровадження описаних у розділі присвяченому створенню автоматизованого бортового комплексу ACMS підходів у реальну практику водного транспорту та формування єдиної системи моніторингу суден у складі аналітичного центру ShipDiMRO, враховуючи раніше проведені наукові дослідження [15, 16], рекомендується [17, 18], в тому числі в інтелектуальному управлінні параметрами системи ТО, передбачити не тільки модуль визначення параметрів технічного стану суднових засобів, телематики супутникової навігації та зв'язку, а і замкнути всі інформаційні системи судна: екіпаж, бортову систему контролю з накопиченням даних і засоби автоматичної ідентифікації судна, на виробничі інформаційні системи водного транспорту, геоінформаційні системи оцінювання рівня шкідливого забруднення середовища водних шляхів конкретних водних шляхів, на процес моніторингу показників ефективності системи ТО через аналіз експлуатаційних характеристик системи ТО. Підходи до вирішення вказаної задачі для вже існуючих суден, які оснащені вбудованою мережею CANopen – можна знайти на рис. 2; для суден, що не оснащені вбудованою мережею CANopen – на рис. 3.

Особливістю структури, що представлено на рис. 2, є здійснення об'єднання всіх інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО через використання вбудованої мережі CANopen судна. В даному контексті, для контролю

системи ТО в процесі експлуатації застосовується бортова система моніторингу, що відповідає стандарту OBD-M, а також інтегрована захищена система моніторингу і технічної діагностики, яка включає контролери-сканери, комунікатори, трекери і, за необхідності, відповідні датчики для контролю експлуатаційних характеристик системи ТО.

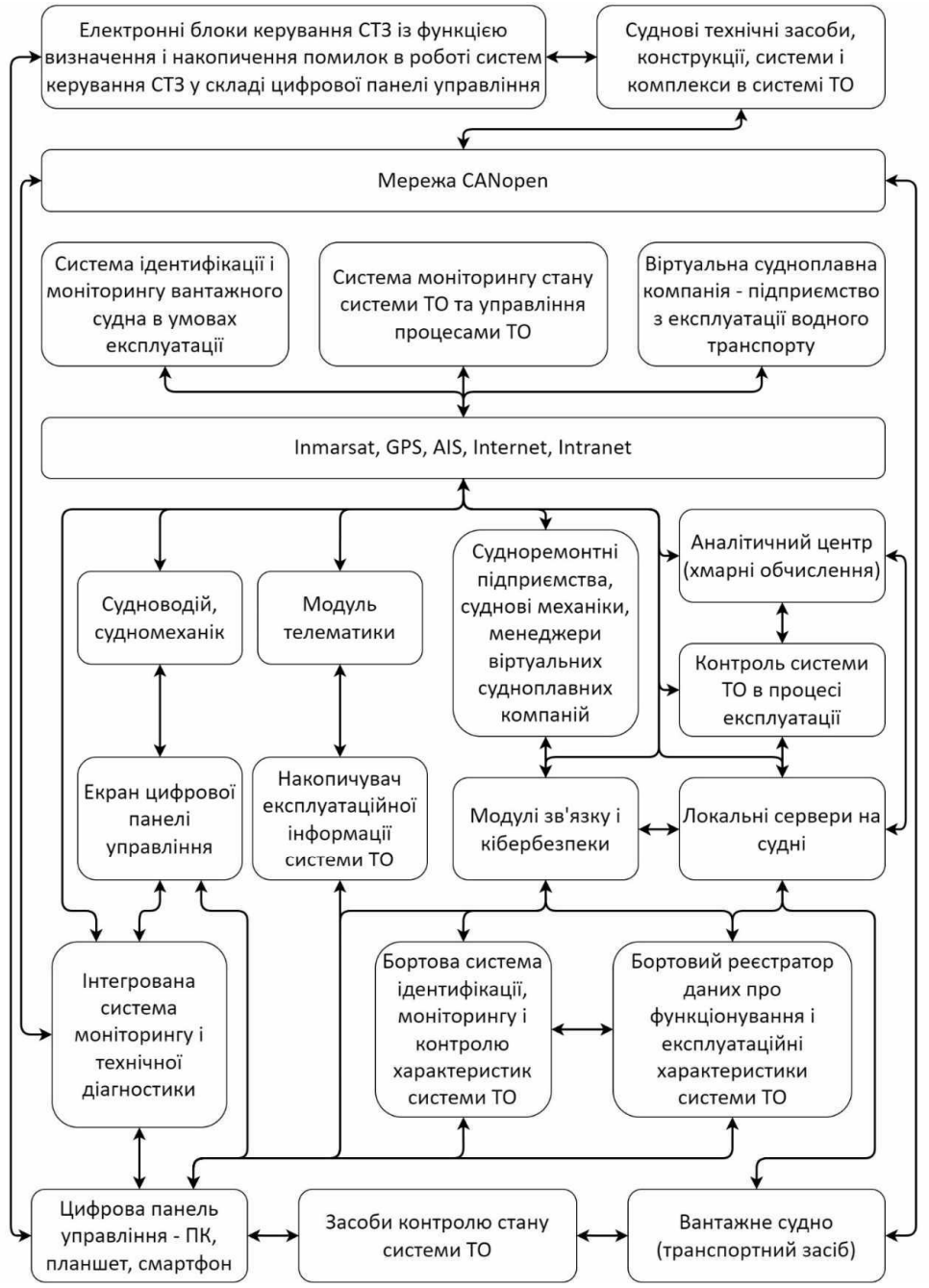


Рисунок 2 – Структура системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО вантажних суден, обладнаних вбудованою мережею CANopen

В даній структурі судна передбачається можливість використання модуля зв'язку, який співпрацює не лише з зовнішніми сервісами, а також може взаємодіяти з внутрішньою бортовою системою для ідентифікації, моніторингу та контролю експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування вантажних суден. Крім того, цей модуль призначений для зберігання даних про ефективність системи технічного обслуговування

вантажного судна, умови його експлуатації, напрацювання та технічні впливи на судно, а також подібні параметри.

Крім того, враховуючи взаємодію суден з іншими суднами в морських маршрутах, їх ідентифікацію в транспортному потоці можна здійснювати за допомогою системи AIS, яка встановлюється безпосередньо на суднах. Процес передачі інформаційних потоків із суден здійснюється постійно в процесі їх технічної експлуатації та включає в себе використання засобів Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet для передачі даних до віртуальної судноплавної компанії – підприємства, яке займається обслуговуванням водного транспорту. Це передбачає відстеження експлуатаційних характеристик системи ТО та управління параметрами системи ТО, а також для оперативного прийняття рішень з метою запобігання небезпечному рівню забруднення водних шляхів і навколишнього середовища. Інформація про технічний стан і умови технічного обслуговування суден, а також дані про рівень забруднення водних шляхів і параметри судноплавства передаються до відповідних систем оцінки рівня забруднення навколишнього середовища на конкретних судноплавних маршрутах і систем ідентифікації та моніторингу вантажних суден в транспортному потоці.

Особливістю структури, що представлено на рис. 3 є те, що об'єднання всіх інформаційних потоків, що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО відбувається шляхом використання уніфікованих захищених промислових протоколів для контролю системи ТО, які безпосередньо впроваджуються на судні.

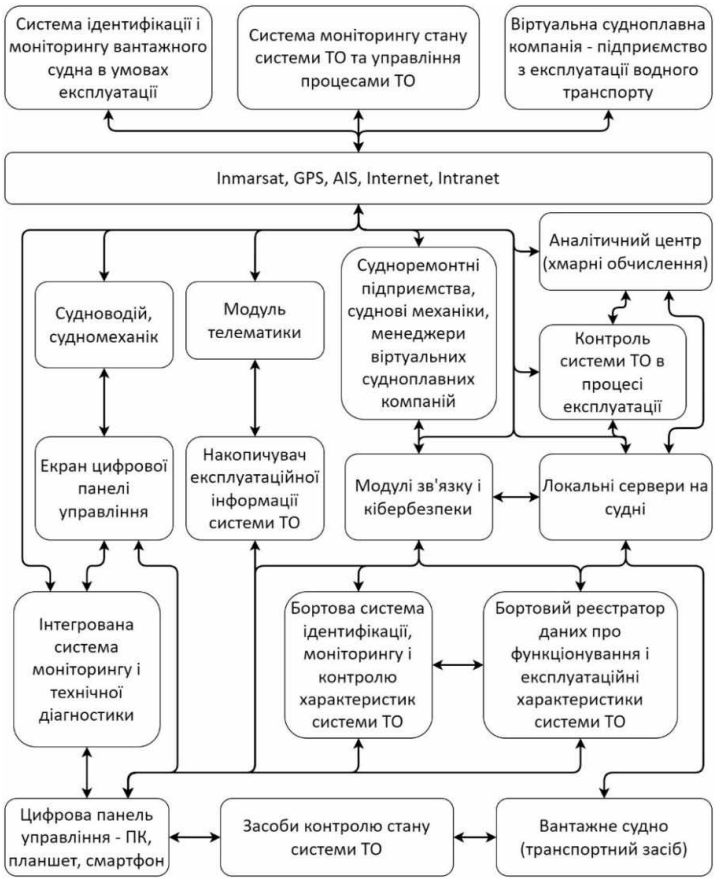


Рисунок 3 – Структура системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО вантажних суден, що не обладнані вбудованою мережею CANopen

В структурі судна має бути передбачена можливість використання модуля зв'язку, локальних серверів і засобів передачі інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО із судна до єдиної системи моніторингу вантажних суден. Ця система функціонує аналогічно описаним вище компонентам бортового комплексу інтелектуальних транспортних систем на судні, які оснащені вбудованою мережею CANopen.

Розроблена процедура обґрунтування комплексу функцій інтелектуальних транспортних систем може стати корисним методичним інструментом для обґрунтування технічних вимог та завдань щодо розробки і створення систем моніторингу, спрямованих на збір технічної інформації про експлуатаційні характеристики системи ТО окремих вантажних суден по всьому світу.

Для потенційного вирішення зазначеної проблеми, яка може виникнути на етапі створення нових суден (рис. 4), або експлуатації суден, оснащених сучасними сторонніми комплексними системами управління і (або) вбудованими комплексами моніторингу систем ТО, які застосовують спеціалізовані версії операційної системи реального часу *RTOS, необхідно поєднання всіх інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО.

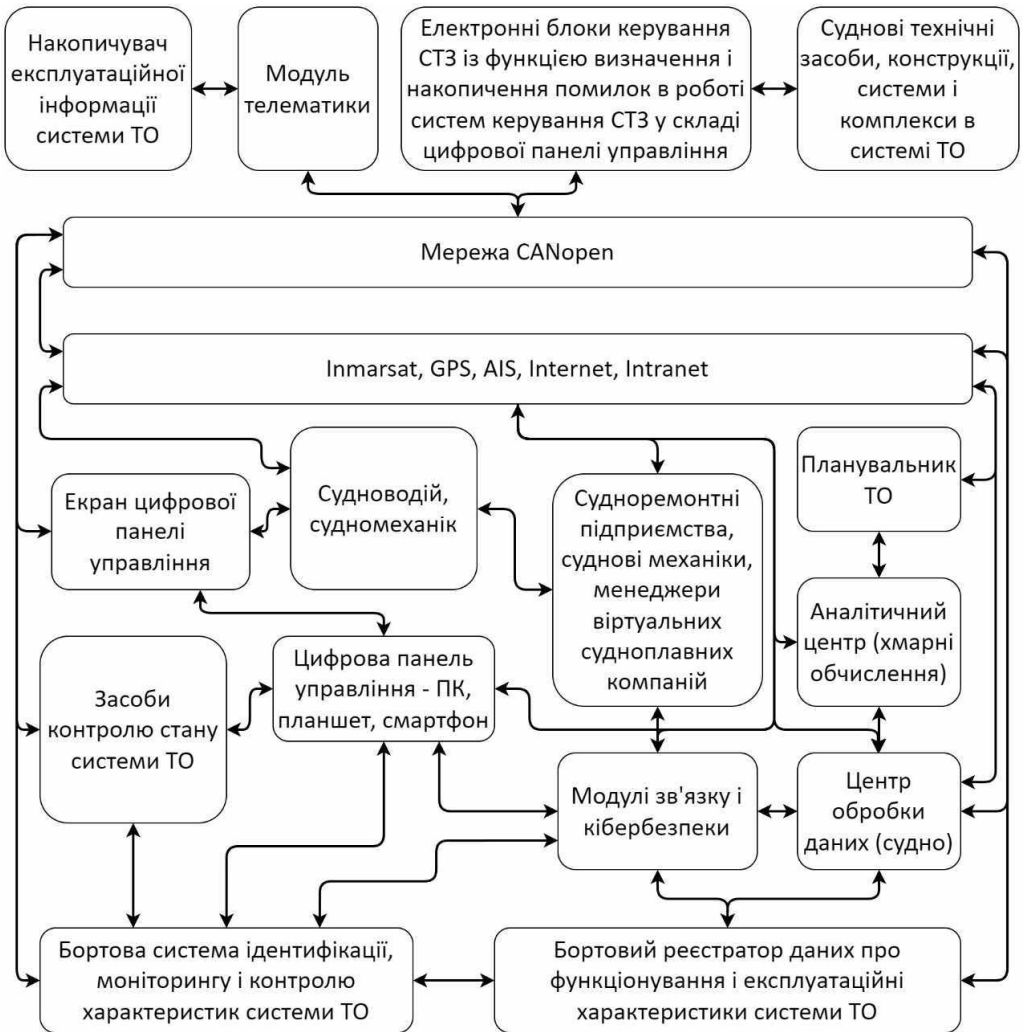


Рисунок 4 - Структура системи моніторингу системи ТО вантажних суден (нових або в експлуатації) у складі комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування

Цей комплекс включає в себе модуль телематики , який слугує для зв'язку з судноводіями та судномеханіками, а також для контролю судна під час взаємодії з транспортними потоками, при виконанні прескриптивного технічного обслуговування, як на судні так і в умовах суднoремонтного підприємства та інші дії, які можуть бути об'єднані в єдину мережу CANopen. Для забезпечення цього, конструкція судна має передбачити можливість використання модулів зв'язку, які можуть взаємодіяти не лише з внутрішньою бортовою системою ідентифікації, моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО, а також локальні сервери і системи

зберігання даних про показники ефективності системи ТО, працездатність суднових технічних засобів, напрацювання і технічний стан механізмів.

Додатково, конструкція судна повинна передбачати можливість при виконанні ідентифікації судна в транспортному потоці використовувати не тільки центр обробки даних на судні, а й хмарні обчислення в аналітичному центрі із залученням модуля планування ТО.

Передача інформаційних потоків з судна в процесі його функціонування до єдиної системи моніторингу суден повинна відбуватися засобами Inmarsat, AIS, Internet, Starlink безпосередньо модулями кібербезпеки.

Як підсумок, запропоновано системний підхід для вирішення завдання створення єдиної системи моніторингу показників ефективності системи ТО у складі інтелектуального управління параметрами системи ТО, незалежно від їх статусу (нові або вже експлуатовані). Цей підхід передбачає створення структури інтелектуальних транспортних систем на основі аналітичного центру ShipDiMRO та може бути використаний як методичний інструмент для обґрунтування технічних вимог при розробці та впровадженні систем моніторингу систем обслуговування вантажних суден по всьому світу.

Висновки. З урахуванням вище зазначених розроблених методик та структур систем моніторингу, можна сформулювати такі висновки:

1. Розроблена загальна методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на основі аналітичного центру ShipDiMRO. Ця методика надає можливість збирати та аналізувати дані щодо стану технічного обслуговування суден для підвищення їх надійності та безпеки.

2. Створено структури систем моніторингу експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування вантажних суден, які оснащені вбудованою мережею CANopen та без неї. Ці структури дозволяють забезпечити відстеження та аналіз різних параметрів обслуговування суден та їх компонентів.

3. Представлена структура системи моніторингу системи технічного обслуговування вантажних суден, незалежно від їх статусу (нові або вже в експлуатації), в складі комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування. Ця структура включає в себе різні модулі та методи збору інформації, що допомагають підвищити ефективність обслуговування суден.

В цілому, стаття надає поглиблене розуміння методів і структур систем моніторингу, які можуть бути використані для вдосконалення системи технічного обслуговування вантажних суден. Ці розробки є важливими для галузі водного транспорту та сприятимуть покращенню безпеки та надійності судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Parida, A. (2006). Maintenance performance measurement system: application of ICT and e-maintenance concepts.

2. Zhou, Y., Kou, G., & Ergu, D. (2014). Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(2), 251–263. https://doi.org/10.1002/qre.1584

3. Ketonen, M., & Marttinen, A. (2001). Real-Time Control performance monitoring as a tool for remote maintenance service. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(9), 41–46. https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)41679-x

4. Tsang, A., Jardine, A., & Kolodny, H. F. (1999). Measuring maintenance performance: a holistic approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(7), 691–715. https://doi.org/10.1108/01443579910271674

5. Samat, H.A., Kamaruddin, S., & Azid, I.A. (2011). Maintenance Performance Measurement: A Review.

6. Kutucuoglu, K. Y., Hamali, J., Irani, Z., & Sharp, J. M. (2001). A framework for managing maintenance using performance measurement systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(1/2), 173–195. https://doi.org/10.1108/01443570110358521

7. Amoedo, M., & Modarres, M. (2006). A structured methodology for identifying performance metrics and monitoring maintenance effectiveness. *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS '06)*. https://doi.org/10.1109/rams.2006.1677381

8. Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (1997). Maintenance performance reporting systems: some experiences. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(1), 4–15. https://doi.org/10.1108/13552519710161508

9. Kumar, U. (2008). Development and implementation of Maintenance Performance Measurement System: Issues and challenges. *In Springer eBooks* (pp. 738–743). https://doi.org/10.1007/978-1-84628-814-2_78

10. 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

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. The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling. (2021). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2019-0-00129-x

14. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. *Maintenance Planning and Scheduling*. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4

15. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transportation Research Procedia*, 14, 1679–1688. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133

16. 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

17. 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

18. 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

REFERENCES

1. Parida, A. (2006). Maintenance performance measurement system: application of ICT and e-maintenance concepts.

2. Zhou, Y., Kou, G., & Ergu, D. (2014). Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance. Quality and Reliability Engineering International, 31(2), 251–263. https://doi.org/10.1002/qre.1584

3. Ketonen, M., & Marttinen, A. (2001). Real-Time Control performance monitoring as a tool for remote maintenance service. IFAC Proceedings Volumes, 34(9), 41–46. https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)41679-x.

4. Tsang, A., Jardine, A., & Kolodny, H. F. (1999). Measuring maintenance performance: a holistic approach. International Journal of Operations & Production Management, 19(7), 691–715. https://doi.org/10.1108/01443579910271674.

5. Samat, H.A., Kamaruddin, S., & Azid, I.A. (2011). Maintenance Performance Measurement: A Review.

6. Kutucuoglu, K. Y., Hamali, J., Irani, Z., & Sharp, J. M. (2001). A framework for managing maintenance using performance measurement systems. International Journal of Operations & Production Management, 21(1/2), 173–195. https://doi.org/10.1108/01443570110358521.

7. Amoedo, M., & Modarres, M. (2006). A structured methodology for identifying performance metrics and monitoring maintenance effectiveness. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS '06). https://doi.org/10.1109/rams.2006.1677381.

8. Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (1997). Maintenance performance reporting systems: some experiences. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3(1), 4–15. https://doi.org/10.1108/13552519710161508.

9. Kumar, U. (2008). Development and implementation of Maintenance Performance Measurement System: Issues and challenges. In Springer eBooks (pp. 738–743). https://doi.org/10.1007/978-1-84628-814-2_78.

10. 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.

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. The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling. (2021). In Elsevier eBooks. https://doi.org/10.1016/c2019-0-00129-x.

14. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. Maintenance Planning and Scheduling. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4.

15. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. Transportation Research Procedia, 14, 1679-1688. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

Golovan A.I.

FEATURES OF THE MODELING METHODOLOGY AND INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING THE EFFICIENCY OF THE CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEM

The article explores enhancing maintenance systems for cargo ships. It examines recent research and publications revealing the necessity of monitoring maintenance system effectiveness and employing information and communication technologies to upgrade ship maintenance.

The purpose of this study is to establish and validate a methodology for modeling and constructing an information system to monitor the maintenance system's efficiency on cargo ships. The objective of the article is to create a comprehensive approach for modeling and constructing an information system that observes the maintenance system's performance as a component of an intelligent maintenance system's parameter management plan, utilizing the analytical center ShipDiMRO. The study examines systems that monitor the performance of maintenance systems for cargo ships. Whether equipped with an integrated CANopen network or not, these systems will be analyzed.

The ultimate goal of this research is to enhance the maintenance systems of cargo ships through effective monitoring, providing the ability to control for technical issues, plan maintenance, and detect malfunctions promptly.

The article presents a modeling methodology for monitoring cargo ship maintenance efficiency. The text explains the monitoring system structures and offers recommendations for their implementation. The conclusion emphasizes the importance of performance measurement for efficient maintenance. The study demonstrates the significance of utilizing various approaches in data analysis and technology application to ensure the system's reliability and efficiency. The research methodology relies on analyzing information flows and implementing information and communication technologies to guarantee dependable monitoring and control of maintenance effectiveness for cargo vessels.

***Keywords**: monitoring, maintenance, cargo ships, efficiency, information technology, data analysis.*

УДК 621.396:629.564.7 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.04

Давидов В.С., Кліндухова В.М., Ляшко О.В., Любарець І.О.

ПРО СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА У МІЛКОВОДНОМУ СТИСНУТОМУ РАЙОНІ В СКЛАДНИХ НАВІГАЦІЙНО-ГІДРОГРАФІЧНИХ І ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ ПЛАВАННЯ

У статті обговорюється проблема забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів в умовах складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умов. Автори вказують на те, що впровадження електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) не призвело до значного зниження аварійності суден, зокрема при посадках на мілини. Розглядаються об'єктивні чинники, які в суттєвій мірі ускладнюють безпечне плавання великогабаритних суден, включаючи обмеження по експлуатації головної енергетичної установки і морехідні характеристики. Наявність великої вітрильності також ускладнює утримання суден на курсі. Конструктивні особливості суден, такі як довгий гальмівний шлях і

наявність тільки одного гребного валу, також мають негативний вплив на їх маневреність і безпеку плавання. Вказується на недостатнє використання усіх наявних можливостей ГНСС для коригування траєкторії руху суден і вирішення навігаційних завдань в режимі реального часу. Габарити каналів і фарватерів також не завжди відповідають розмірам сучасних суден, що призводить до стиснення великогабаритних суден у можливості здійснення маневру і ризику посадок на мілини під час циркуляції. У статті пропонується підхід до оцінки показників навігаційної безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів шляхом розробки математичної моделі, яка б дозволила покращити безпеку їх плавання в складних умовах. Автори також вказують на можливість використання штучного інтелекту для автоматизації процесів керування суднами в небезпечних ситуаціях. Представлена математична модель руху великогабаритного судна контейнеровозу потребує подальшої розробки та проведення подальших досліджень та розробок для покращення безпеки плавання таких суден.

Ключові слова: *безпека плавання, навігація, математична модель руху, складні умови, великогабаритний, судно контейнеровоз.*

Постановка проблеми. Аналіз навігаційної аварійності в цілому свідчить, що друге місце за кількістю аварійних морських подій займають посадки суден на мілину, які як правило, є наслідком значних похибок у визначенні місця розташування судна на траєкторії руху, особливо на циркуляції, неможливості учасників судноводіння забезпечити навігаційну безпеку в складних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах плавання. Райони прибережного плавання, обмежені умови гаваней і портів, які характеризуються відносно малими глибинами і великою інтенсивністю судноплавства є місцем переважної кількості тяжких аварій. Найбільшу загрозу вони представляють для великотоннажних вантажних і пасажирських суден. За результатами досліджень Європейського агентства з безпеки на морі за 2021р. за попередні 7 років аварійність саме цих типів суден не зменшується та залишається, практично на одному рівні (рис.1) [1].

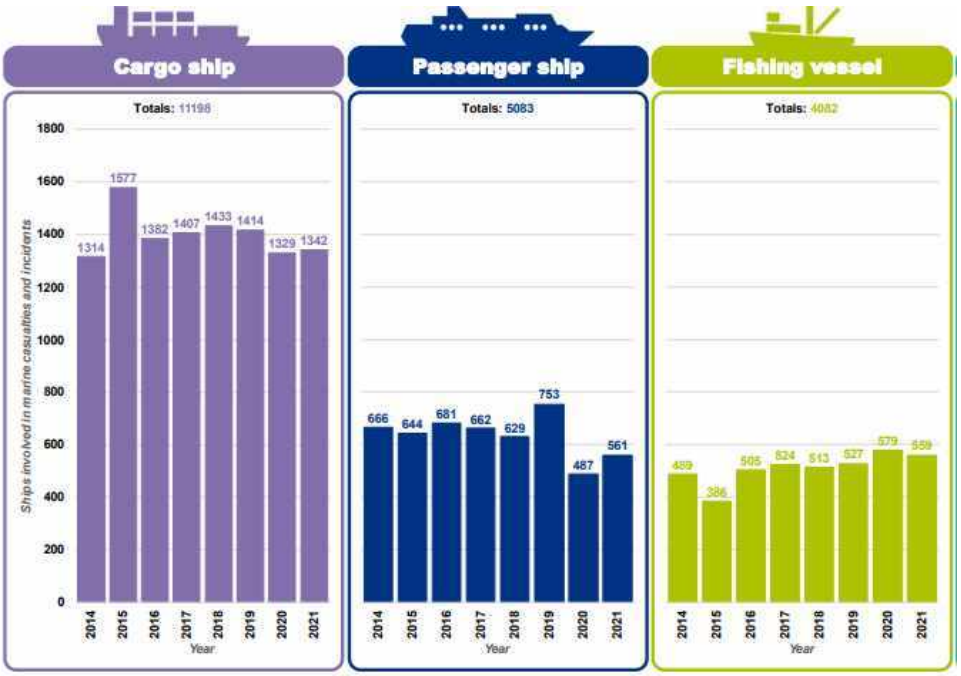


Рисунок 1 – Кількість АМП у період з 2014-2021 р. за типом суден

Поява на морських суднах електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і приймачів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), які дозволили в значній мірі

автоматизувати високоточний контроль місця розташування суден на траєкторії руху в режимі «online», не привела до значного зниження аварійності, зокрема й пов'язаної з посадками на мілину[1]. Використання функцій: «завдання безпеки», «виявлення поточної небезпечної ізобати і небезпечних об'єктів», а також «автоматичного захоплення і супроводу цілей при накладенні зображення радіолокаційної станції (РЛС) на електронну карту (ЕК)» [2,3] в існуючих ЕКНІС, які використовуються при проводці суден в каналах і на акваторіях портів і гаваней не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великогабаритних контейнеровозів в складних умовах.Цьому сприяють такі об'єктивні чинники, як: значна кількість обмежень по експлуатації головної енергетичної установки, морехідні характеристики і параметри маневрування.

Наприклад, для уникнення втрати керованості на малому ходу і зменшення зносу від вітру, при наявності величезної вітрильності, необхідно тримати підвищену швидкість руху. Та наявність обмежень експлуатації суднових дизелів (на прикладі дизеля марки SULZER 10RTA96C-B потужністю в 54942.6 кВт або 74700 к. с.), а саме мінімальних безпечних критичних обертів які складають 23 об/хв; що відповідає швидкості близько 7 вузлів; мінімальної швидкості самого малого переднього ходу 7.4 вузли, яка відповідає 26 об/хв та зменшеного до 70% коефіцієнта потужності рушія при роботі на задній хід. Велика вітрильність великотоннажних суден, яка для контейнеровозів, за площею дорівнює 3-м стандартним футбольним полям (площа 1-го футбольного поля S = 7560кв. м) ускладнює утримання судна на осі каналу або суднового ходу [4]. Одногвинтова схема побудови головної енергетичної установки для великовантажних контейнеровозів в значній мірі знижує її надійність та призводить практично, до втрати керованості судна при виході з ладу, або заклинюванні рульового пристрою.

При маневруванні великогабаритних суден, виникають складнощі виведення судна в точку повороту і на нову лінію шляху через неможливість оперативного точного обліку відомими штурманськими способами зміщення полюса повороту і збільшення радіусу циркуляції при плаванні на мілководді при наявності сумарного зносу від вітру і різних видів течій. В суднових ЕКНІС не в повній мірі використовуються можливості високоточного місця судна, отриманого за допомогою приймачів ГНСС, що працюють в спеціальних режимах, (точність яких порівнянна з точністю масштабу електронної карти) для коригування траєкторії руху судна по пеленгам і дистанціям на підводні і надводні навігаційні небезпеки від свого високоточного місця в автоматичному «online» режимі [2].

Габарити існуючих каналів і фарватерів доволі часто не відповідають габаритам сучасних великотоннажних суден, які в багатьох портах світу і на підходах до них обмежені своєю осадкою і розмірами. Це призводить, при плаванні на мілководді, до погіршення керованості і збільшення радіусів циркуляції, які не завжди підлягають точному обліку при плаванні на циркуляції і як наслідок виходу однієї з кінцівок судна за межі смуги руху, що й призводить до дотиків до ґрунту і посадок на мілину [5].

Конструктивні особливості суден і їх маневрені характеристики, закладені на стадії проектування також негативно впливають на безпеку плавання великогабаритних контейнеровозів: велика тоннажність суден визначає довгий гальмівний шлях як при пасивному так і активному гальмуванні, який становить тисячі метрів; значна частина сучасних суден - одновальні, що негативно позначається на їх маневреності та повороткості і з урахуванням дуже великої вітрильності, особливо контейнеровозів, автомобілевозів і газовозів, призводить до того, що часом, при сильному вітрі не вистачає зусиль гвинта-кермового комплексу для утримання суден в заданій смузі на траєкторії руху або на лінії створу [6].

Особливої уваги заслуговує неможливість судноводіїв великотоннажних суден з дуже великою вітрильністю з об'єктивних причин забезпечити навігаційну безпеку в складних швидкозмінних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах прибережного плавання після проходження точки «неповернення» [7].

Результати аналізу АМП, існуючих прибережних і портових систем руху суден, суднових і берегових навігаційних систем безпеки плавання, які використовуються при проводці суден в каналах і в акваторіях портів і гаваней дозволяють зробити висновок про те, що існуюча система безпеки плавання не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великотоннажних суден в скрутних умовах.

Мета роботи. Створення математичної моделі руху великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі в складних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах плавання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями математичної моделі руху судна займався Драчов В.М. та Я. Йошімура. У праці «Врахування циркуляції в стиснених умовах» Драчова В.М. було виконано аналіз математичних моделей керованості судна на мілині, здійснено теоретичне обґрунтування залежностей, що визначають бокове і поздовжнє відхилення судна при виході на новий курс, та вплив мілин на елементи циркуляції.

У праці Я. Йошімури «Математична модель руху судна» було запропоновано і розроблено багато видів математичних моделей, які можна використовувати за допомогою обчислювальних інструментів. В результаті роботи було доведено, що кожна математична модель має свої переваги для конкретної мети моделювання [9].

У наукових дослідженнях та наукових статтях наведених вище авторів детально не розглядалися такі вкрай важливі для безпеки судноводіння питання як:

1. Вирішення існуючого протиріччя між знанням високоточного місця судна на траєкторії його руху за допомогою спеціальних режимів роботи ГНСС та недостатньо високою точністю контролю положення судна, щодо навігаційних небезпек, по пеленгах та дистанціях за допомогою суднових засобів автоматичної радіо прокладки (ЗАРП);

2. Не досліджено додаткові можливості ЕКНІС, щодо використання координатного курсору як високоточного кутомірно-далекомірного пристрою. У існуючих ЕКНІС не передбачено опцій або функцій, що дозволяють реалізувати можливості високоточного місця судна для вимірювання напрямків та дистанцій від кінцівок судна до навігаційних об'єктів за допомогою координатного курсору;

3. Прогнозування місцезнаходження носа та корми судна на траєкторії руху з урахуванням безперервно змінливих напрямів та відстаней до небезпечних навігаційних об'єктів, у тому числі підводних, та з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик;

4. Облік елементів поворотності судна з урахуванням впливу полюса повороту на поведінку судна при плаванні в водах з малими глибинами внутрішньо-портового та прибережного плавання;

5. Питання зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції;

6. Підвищення навігаційної інформативності про положення носа та корми судна на траєкторії руху на електронній карті, у тому числі, шляхом:

– постійного відображення фактичної траєкторії руху судна у вигляді лінії шляху до границі електронної карти та збереження її після зміни масштабу карти;

– відображення на лінії попередньої прокладки розрахункового місця судна відповідно до плану переходу.

Виклад основних матеріалів дослідження. Для забезпечення безпеки плавання великотоннажних суден контейнеровозів по запланованій траєкторії руху на циркуляції в мілководних стиснених умовах необхідно врахувати значну кількість різнорідної інформації з безліччю різних параметрів, які після відповідної математичної обробки перетворюються на інформаційні дані та керуючі сигнали при вирішенні завдань навігації та управління. Модель забезпечення безпечного руху великотоннажних суден контейнеровозів по запланованій траєкторії руху на циркуляції в мілководних стиснених умовах покликана встановити алгоритмічну залежність вихідного ефекту запропонованої моделі, що визначається цільовою функцією (F(T)) та її показниками ефективності (α) від сукупності параметрів (Y) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

$$Y \in Z = \{F(T), \alpha \in G\}, \quad (1)$$

$$Y = Y\ (\overline{A}_1, \overline{A}_2, \overline{A}_3, \overline{A}_4, \overline{A}_5, \overline{A}_6, \overline{A}_7, \overline{A}_8, \overline{A}_9, \overline{A}_{10}, \overline{A}_{11}) \quad (2)$$

де, $\overline{A}_1$– основні техніко-експлуатаційні характеристики судна;

$\overline{A}_2$– інерційно-гальмівні параметри судна;

$\overline{A}_3$– параметри стійкості судна на циркуляції;

$\overline{A}_4$– параметри повороткості судна;

$\overline{A}_5$– параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху;

$\overline{A}_6$– параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору;

$\overline{A}_7$– параметри гідрологічної обстановки;

$\overline{A}_8$– параметри гідрометеорологічних умов;

$\overline{A}_9$– параметри основних суднових та берегових засобів визначення місця розташування судна на траєкторії руху;

$\overline{A}_{10}$– параметри зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції;

$\overline{A}_{11}$– параметри роботи буксирів і підрулюючих пристроїв.

У розгорнутому вигляді перелічені параметри можна уявити наступним чином:

$$\overline{A}_1 = \left(L_{max}, B_{max}, D_{пор}, DW, W_{кон.}, V_{max}, Vmin\right), \quad (3)$$

де, Lmax – довжина судна;

Bmax – ширина судна;

Dпор – вантажопідйомність судна;

DW – дедвейт судна;

Wкон– контейнерна вантажомісткість судна;

$Vmax$ – максимальна швидкість судна;

$Vmin$ - мінімальна швидкість судна

$$\overline{A}_2 = (S_ц, Тц, S_{пг}, t_{пг}, S_{ат}, t_{ат}), \quad (4)$$

де, Sц – відстань, яку проходить судно на запланованій циркуляції;

Tц – час руху на запланованій циркуляції;

Sпг – відстань, яку проходить судно при пасивному гальмуванні;

tпг – час пасивного гальмування судна;

Sаг – відстань, яку проходить судно при активному гальмуванні;

tат – час активного гальмування судна.

$$\overline{A}_3 = (S\text{к}, Rц, \psi c, \theta(c), Xр, V\text{кр}, \Delta V\text{м}, \Delta d\text{кр}, \Delta d\text{в}) \quad (5)$$

де, Sк – площа керма судна;

Rц – радіус циркуляції судна;

ψс – диферент судна на ніс або корму;

θс – крен на правий або лівий борт судна;

Xр – положення полюса повороту судна відносно центру мас;

Vкр – критична швидкість судна;

ΔVм – утрата швидкості за рахунок просідання на мілководді;

Δdкр – утрата посадки судна від крену;

Δdв – просідання судна на хвилюванні.

$$\overline{A}_4 = (l1(\delta),\ l2(\delta),\ l3(\delta), Dт\ (\delta),\ \ Dv\ (\delta), Tμ(Vн\delta\ ), \Delta R), \quad (6)$$

де, $l1(\delta)$ – висув судна на циркуляції;

$l2(\delta)$ – зміщення судна на циркуляції;
$l3(\delta)$ – зворотне зміщення судна на циркуляції;
Dт (δ) – тактичний діаметр циркуляції судна;
$Dv\ (\delta)$ – діаметр циркуляції судна, що встановилася;
$T\mu(V$н$, \delta)$ – період циркуляції судна;
ΔR – ширина смуги руху судна на циркуляції

$$\overline{\text{А}}_5 = (\text{Всх}, l\text{нс}, l\text{кс}, \text{Тпр}, \varphi\text{нс}, \lambda\text{нс}, \varphi\text{кс}, \lambda\text{кс}, \text{Мо}), \quad (7)$$

де, Всх – ширина суднового ходу;
lнс – бічне та за курсом відхилення носу судна від запланованої траєкторії руху;
lкс – бічне відхилення корми судна від запланованої траєкторії руху;
Тпр – прохідна осадка судна;
φнс – географічна широта розташування носа судна;
λ нс – географічна довгота розташування носа судна;
φкс – географічна широта розташування корми судна;
λкс – географічна довгота розташування корми судна;
Мо – середньоквадратична похибка позиціонування носа і корми судна на траєкторії руху.

$$\overline{\text{А}}6 = (\varphi\text{кк}, \lambda\text{кк}, \varphi\text{но}, \lambda\text{но}, \text{ІПно}, D\text{но}, \text{Мкк}), \quad (8)$$

де, φкк – широта кінця координатного курсору;
λкк – довгота кінця координатного курсору;
φно – широта навігаційних орієнтирів в електронній базі ЕКНІС;
λно – довгота навігаційних орієнтирів в електронній базі ЕКНІС;
ІПно – справжній пеленг з носа (корми) судна на навігаційний орієнтир;
Dно – відстань від носа (корми) судна до навігаційного орієнтиру;
Мкк – середньоквадратична похибка вимірювання відстаней за допомогою координатного курсору.

$$\overline{\text{А}}_7 = (d, \text{Нг}, \text{Н}min, \Delta h\text{пад.}, \rho, \text{Кт}, V\text{т}, \beta\text{т}), \quad (9)$$

де, d – допустима прохідна осадка;
Нг – критерій гарантованої глибини плавання;
Нmin – мінімально допустима глибина в районі плавання;
Δhпад. – падіння рівня води при скиданні і при відливі;
ρ – щільність морської води;
Кт – напрямок течії;
Vт – швидкість течії;
βт – кут знесення на течії.

$$\overline{\text{А}}_8 = (\text{Sп}, \text{qw}, \text{W}, \alpha, \text{hв}, \tau\text{в}, \lambda\text{в}, \text{De}, \text{Рнгму}), \quad (10)$$

де, Sп – площа вітрильності судна;
qw – курсовий кут вітру;
W – швидкість вітру, що здається;
α – кут дрейфу судна від вітру;
hв – висота вітрової хвилі;
τв – період вітрової хвилі;
λв – довжина вітрової хвилі;
De – географічна дальність видимого горизонту;
Рнгму – ймовірність несприятливих гідрометеоумов

$$\overline{\text{А}}_9 = (\boldsymbol{Q}\text{рлс}, \boldsymbol{Q}\text{гк}, \boldsymbol{Q}\text{гнсс}, \boldsymbol{Q}_{\text{БРЛС}}, \boldsymbol{Q}\text{лд}, \text{Рмс}), \quad (11)$$

де, Qрлс – експлуатаційні характеристики суднових радіолокаторів;
Qгк – експлуатаційні характеристики суднових курсовказівників;
Qгнсс – експлуатаційні характеристики ГНСС;
$Q_{\text{БРЛС}}$ – експлуатаційні характеристики берегових радіолокаторів;

Qлд – експлуатаційні характеристики лазерних далекомірів;
Рмс – ймовірність отримання повної та достовірної інформації про місцезнаходження судна на траєкторії руху, що надходить від суднових та зовнішніх джерел навігаційної інформації.

$$\overline{\text{А}}_{10}= (F\text{в}, \text{Мв}, R\text{к}, \text{Мк}, V\text{пц}, V\text{кц}, V\text{нц}, \text{Мі}), \quad (12)$$

де, Fв – бічна сила, яка викликана вітром;
Мв – момент сили вітру;
Rк – бокова сила керма;
Мк – момент бокової сили керма;
Vпц – швидкість судна до початку циркуляції;
Vкц – швидкість судна в кінці циркуляції;
Vнц – небезпечна швидкість судна на циркуляції;
Мі – накопичений, чинний момент інерції.

$$\overline{\text{А}}_{\mathbf{11}}= (R_{\sum}, F\text{гв}, F\text{шб}, F\text{гк}, F\text{пу}), \quad (13)$$

де, $R_{\sum}$ – сумарний опір води та повітря судну та буксирам;
Fгв – сила, що створюється гребним гвинтом;
Fшб – сила штовхання, що створюється буксирами;
Fгк – сила на гаке кормового буксира, що гальмує;
Fпу – сила, що створюється підрулюючими пристроями.

Цілком логічно, що для забезпечення безпеки плавання великогабаритних суден контейнеровозів, всі параметри функції (1) повинні мати оптимальні значення. Ці параметри не мають важливого значення при плаванні судна в відкритому морі, проте при плаванні великогабаритних контейнеровозів на мілководді, знання значень цих параметрів буде дуже корисним для судноводіїв.

Отже перші параметри - $\overline{\text{А}}_1$, основні техніко-експлуатаційні характеристики судна. Як видно з формули (3) основні техніко-експлуатаційні характеристики судна – це довжина судна, ширина судна, вантажопідйомність судна, дедвейт судна, контейнерна вантажомісткість судна, максимальна швидкість судна та мінімальна швидкість судна. Всі ці характеристики так чи інакше мають вплив на керованість та стійкість судна. Особливу увагу, слід приділити мінімальній швидкості. Тому що при плаванні на мілководді судно повинно рухатись з якомога меншою швидкістю задля мінімізації гідродинамічного просідання. Значення мінімальної швидкості у великих суден контейнеровозів може досягати 7-8 вузлів [4]. Це чи не найважливіша техніко-експлуатаційна характеристика при визначенні параметру $\overline{\text{А}}_1$ при плаванні великогабаритного контейнеровозу на циркуляції на мілководді. Саме від цього параметру залежатиме накопичення моменту інерції, значення крену судна, величина динамічного просідання, період циркуляції, діаметр циркуляції, кут дрейфу та ін. [5]. Якщо інші характеристики (довжина, дедвейт, ширина, та ін..) неможливо змінити, то швидкість можна збільшити, або ж зменшити (за допомогою буксиру, чи короткочасної роботи рушіїв на задній хід).

Інерційно-гальмівні параметри судна - $\overline{\text{А}}_2$, залежать від: відстані, яку проходить судно на запланованій циркуляції, часу руху на запланованій циркуляції, відстані, яку проходить судно при, пасивному гальмуванні, часу пасивного гальмування судна, відстані, яку проходить судно при активному гальмуванні та часу активного гальмування судна. Ці значення залежать від конструктивних особливостей, завантаження судна, та його швидкості. Швидкість, як було сказано вище, судноводій може змінювати таким чином покращуючи, чи погіршуючи інерційно-гальмівні параметри.

Параметри $\overline{\text{А}}_{\mathbf{3}}$ - характеризують стійкість судна на циркуляції, та залежать від: площі керма судна, радіусу циркуляції судна, диференту судна на ніс або корму, крену судна, положення полюсу повороту судна відносно центру мас, критичної швидкості судна, утраті швидкості за рахунок просідання на мілководді, утраті посадки судна від крену, просідання

судна на хвилюванні. Знову ж таки - радіус циркуляції, положення полюсу повороту, втрата швидкості від просідання прямо залежать від швидкості судна. Диферент та крен залежать від посадки судна, та також частково від швидкості судна.

Параметри $\overline{A}_4$– залежать від: висуву судна на циркуляції, зміщення судна на циркуляції, зворотного зміщення судна на циркуляції, тактичного діаметру циркуляції судна, діаметру циркуляції судна, що встановилася, періоду циркуляції судна та ширини смуги руху судна на циркуляції. Ці величини залежать від конструкційних особливостей судна і від швидкості.

Параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху - $\overline{A}_5$, як видно із формули (7), суттєво залежать від розмірів суднового ходу та конструкційних особливостей судна.

Параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору –$\overline{A}_6$, також не можуть бути змінені судноводієм і залежать від точності електронної карти, можливостей програмного забезпечення та точності сигналу ГНСС.

Параметри гідрологічної обстановки – $\overline{A}_7$, залежать від місця плавання та мають властивість швидко змінюватись. На них, очевидно, також не можна впливати, проте їх потрібно вміти враховувати та користуватись ними.

Наприклад, на рис. 2 відображено заплановану циркуляцію контейнеровозу (пунктирна лінія) та 10 реальних траєкторій того ж самого судна (кольорові лінії), яке регулярно заходило в один і той самий порт [5].

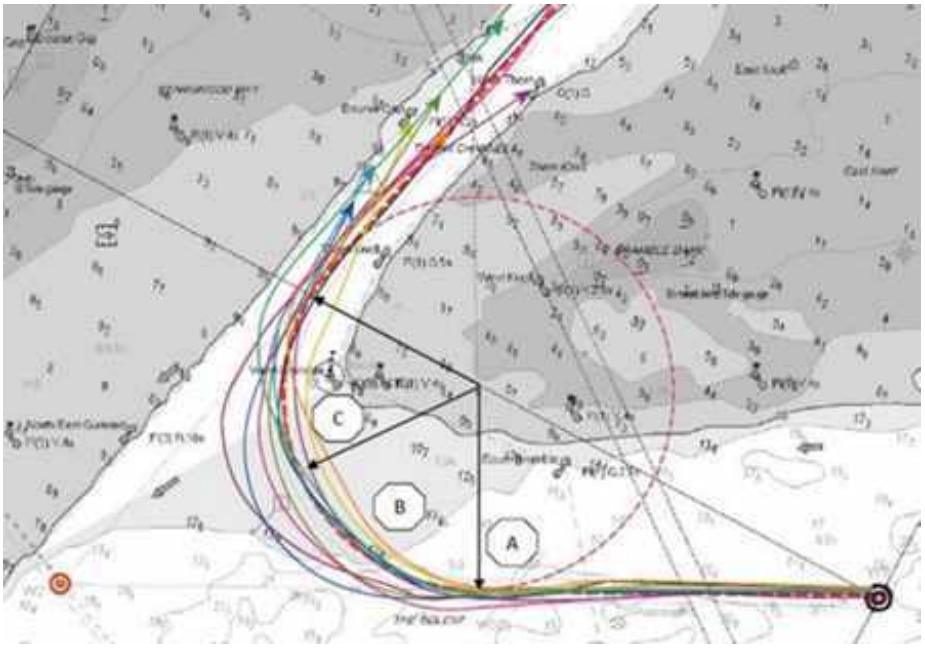


Рисунок 2 – Траєкторія фактичних циркуляцій судна порівняно з запланованою під впливом вітру та течії.

Як видно з рисунку, в більшості випадків, течія значно зносила судно, через що, діаметр циркуляції збільшувався. Навіть емпіричним шляхом не завжди вдається визначити момент перекладки керма для здійснення циркуляції запланованою траєкторією. Через те, що швидкість та напрямок течії постійно змінюється та змінюється підводний об’єм судна, кожен раз течія по різному впливає на стійкість судна на циркуляції. Проте, якщо напрямок та швидкість течії постійні, або ж достовірно відомі, її вплив можливо врахувати і робити так, щоб мінімізувати її вплив, або ж зробити так, щоб вона допомагала судну повертати.

Параметри гідрометеорологічних умов - $\overline{A}_8$, за своєю природою схожі з гідрологічними параметрами – на них не можна впливати, проте їх можна розраховувати і користуватись ними. Загалом, модель забезпечення безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів, як раз таки в більшості залежить від гідрологічних і гідрометеорологічних параметрів. Всі інші параметри

можливо легко прорахувати та більшість з них буде відома відразу після проведення ходових випробувань судна. Наприклад мінімальна швидкість судна, чи ефект просідання судна на мілині. Основні техніко-експлуатаційні характеристики, інерційно-гальмівні параметри, параметри стійкості судна на циркуляції, параметри повороткості судна, параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху, параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору – всі вони, хоч і впливають на модель забезпечення безпечного руху, але вони відомі. Параметри ж $\overline{A}_7$ та $\overline{A}_8$, часто бувають невідомі, або частково відомі. Вітер може бути шквальний, течія може змінювати напрямок та швидкість, вітрильність контейнеровозу змінюється з кожним портом - в залежності від варіанту завантаження. В лоціях, як правило, пишеться: «течія SW, 1-2 вузли». В прогнозах погоди вказують «Переважно північний вітер від 5 до 10 м/с»[10]. Течія зі швидкістю 2 вузли та вітер швидкістю 10 м/с матимуть в два рази більший вплив на судно ніж 1 вузол, та 5 м/с, відповідно. Туман в районі плавання, в свою чергу, в рази збільшить ризик аварійної морської пригоди. Тож, при розробці моделі забезпечення безпечного руху судна, до розрахунку доцільно брати найгірші з потенційно можливих значення параметрів $\overline{A}_7$ та $\overline{A}_8$. Тоді у судноводія буде можливість підготуватись до найгіршого вірогідного сценарію.

Параметри основних суднових та берегових засобів визначення місця розташування судна на траєкторії руху – $\overline{A}_9$, в більшості залежать від якості встановленого обладнання. Але й не слід недооцінювати вміння ефективного використання навігаційного обладнання. Наприклад, неправильно налаштована чутливість радару, призведе до того, що деякі риси берегу не будуть відображатись на екрані РЛС – через це, судноводій не зможе швидко та ефективно перевірити координати судна, отримані за допомогою ГНСС. Знову ж таки, приймач ГНСС може бути налаштований на звичайний режим роботи, а не на диференційний, що може залишитись непоміченим судноводієм і в результаті цього суттєво знизиться ймовірність отримання повної та достовірної інформації про місцезнаходження судна на траєкторії руху.

Параметри зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції - $\overline{A}_{10}$, залежать від швидкості судна, діаметру циркуляції та водотоннажності судна. Накопичений, діючий момент інерції – це похідна від швидкості. Він збігається з курсом судна на прямому ходу. При поворотах, особливо різких, вектор дії сили може відрізнятися від курсу судна до 30-40 градусів, що викликає дрейф судна в протилежний бік повороту. Діаметр циркуляції, в свою чергу, залежить від кута перекладки керма та швидкості. Чим більший кут перекладки керма та чим вища швидкість, тим більша буде різниця між курсом судна та вектором дії сили накопиченого моменту інерції судна і тим більшою буде вірогідність відхилення від запланованої траєкторії циркуляції [11].

Параметри роботи буксирів і підрулюючих пристроїв - $\overline{A}_{11}$, залежать від потужності буксирів, потужності підрулюючих пристроїв та положення полюса повороту судна відносно центру мас. Момент сили від роботи кожного з буксирів залежить від того, з якою потужністю працюють буксири та від положення полюсу повороту. Це проілюстровано на рис. 3 [12].

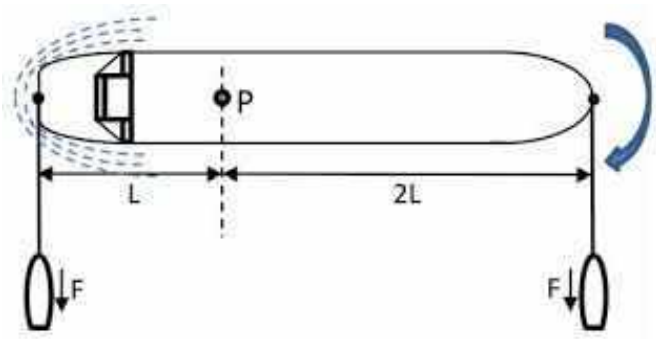


Рисунок 3 – Полюс повороту судна та робота буксирів.

Як видно з рисунку, плече сили носового буксиру вдвічі більше ніж плече сили кормового буксиру. Тому при роботі з однаковою потужністю, момент сили носового буксиру буде вдвічі більшим за момент сили кормового буксиру, що змусить судно повертати праворуч. Для того, аби змусити судно рухатись латеральне (ніс та корма мають рухатись в напрямку дії вектору сили обох буксирів з однаковою швидкістю), можливо наказати капітану носового буксиру зменшити зусилля вдвічі. Або ж, збільшувати швидкість судна до тих пір, поки полюс повороту не досягне тієї точки, коли плечі сили обох буксирів будуть рівними. Знання властивостей положення та зміни положення полюсу повороту є ключовим навиком судноводіїв при маневруванні великогабаритного судна на мілководді та в стиснених умовах. Це знання дає змогу ефективно приймати відповідні рішення та давати керуючі сигнали, які забезпечують безпеку плавання судна.

Основною вимогою, що висувається до розглянутої системи забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі у складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах є досягнення всіма показниками безпеки своїх найкращих значень. При цьому в загальному випадку повинні бути виконані такі умови:

$$l\text{нс} \to min, l\text{кс} \to min, D\text{но} \to max, P\text{мс} \to max, \quad (14)$$

З вищевикладеного стає очевидним, що досягнення поставленої мети – забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі у складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах досягається безліччю різних параметрів, тобто постає завдання багатокритеріальної оптимізації. На практиці досить поширений підхід до побудови критерію [13, 14], у якому від кількох показників переходять до однієї багатоцільової функції F(T) цих показників-так зване згортання показників. Надалі при розвитку теми передбачається виділення серед показників двох головних і переведення інших у розряд обмежень.

При заданих параметрах: $\overline{\text{А}}_1$– $\overline{\text{А}}_4$, $\overline{\text{А}}_6$–$\overline{\text{А}}_{11}$ необхідно мінімізувати відхилення носа та корми судна від запланованої траєкторії руху під впливом складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умов плавання та накопиченого чинного моменту інерції за такими критеріями:

$$J_1 = l\text{нс} \to min, J_2 = l\text{кс} \to min, \quad (15)$$

При заданих обмеженнях:

$$D\text{но} \geq D\text{зад.}, \text{Рмс} \geq \text{Рзад}, \quad (16)$$

$$\overline{\text{А}}_5 = (\text{Всх}, l\text{нс}, l\text{кс}, \text{Тпр}, \varphi\text{нс}, \lambda\text{нс}, \varphi\text{кс}, \lambda\text{кс}, \text{Мо}), \quad (17)$$

$$\overline{\text{А}}_{10} = (F\text{в}, \text{Мв}, R\text{к}, \text{Мк}, V\text{пц}, V\text{кц}, V\text{нц}, \text{Мі}), \quad (18)$$

Висновки. На підставі запропонованого підходу до вибору показників навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі при складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах стане можливим:

1. Врахувати значну кількість різнорідних показників, що прямо чи опосередковано впливають на навігаційну безпеку плавання великогабаритного контейнерного судна;
2. Створити математичну модель навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна, що встановлює алгоритмічну залежність між її вихідним ефектом та сукупністю параметрів, що пропонуються для дослідження;
3. Надалі, на підставі аналізу можливостей математичної моделі, розробити алгоритми та практичні рекомендації щодо покращення критеріїв її роботи, у тому числі, щодо автоматизації

процесів керування судном за допомогою можливостей штучного інтелекту шляхом формування ним у ЕКНІС виконавчих сигналів керування на засоби керування напрямком руху і рушії судна в разі відсутності реакції на небезпечну ситуацію, що складається, з боку вахтового помічника капітана або капітана судна, за ознаками відсутності маневру судна, яка може бути пов'язана з їх обмеженими фізичними можливостями або промахами в розрахунках і оцінки ситуації за інформацією від інших менш точних засобів судноводіння. Це призводить до завчасної автоматичної зміни курсу та (або) швидкості судна для безпечного проходження кінцівками судна навігаційних небезпек.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.

2. Давидов В.С. Повышение эффективности эксплуатации функциональной системы: специализированное судно управления – глубоководный подводный аппарат путем использования высокоточных систем позиционирования/ Давыдов В.С., Демичев В.В.//Водный транспорт.- К.:КДАВТ,2016.-№2(25).-С. 48-53.

3. Богомья В.І. Пути повышения эффективности функционирования украинских космических систем наблюдения Земли. /Богомья В.И., Давыдов В.С., Загорулько А.Н. и др.// Водный транспорт. – К.: КДАВТ, 2010. – №11. –С.5-11.

4. China Shipbuilding Corporation, Maneuvering information for USCG, K3979103, 2004 p. 3;

5. Jasna Prpić-Oršić, Joško Parunov , Igor Šikić, Operation of ULCS - real life, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2014) 6:1014~1023, http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228, pISSN*: 2092-6782*.

7. Zhou, Y.; Daamen, W.; Vellinga, T.; Hoogendoorn, S.P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. Ocean Eng. 2020, 213, 107774.

8. Ming-Chung Fang; Jhih-Hong Luo; Ming-Ling Lee A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. Journal of Ship Research, 2005, https://doi.org/10.5957/jsr.2005.49.2.69, p.69-79.

9. Yasuo Yoshimura, Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion, Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction August, Tokyo, 2005, p. 1-6 c.

10. United Kingdom Hydrographic Office, Mariner's Handbook, Taunton, UK, 2020, p. 103.

11. Nathanael Esnault; Nitish Patel; Jon Tunnicliffe, Steering Induced Roll Quantification During Ship Turning Circle Manoeuvre, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560998, 2021.

12. Frost A., Practical Navigation for Officers of the Watch, Brown, Son & Ferguson LTD., Glasgow, 2023, p. 347.

13.Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. / Сиразетдинов Т.К. − М.: Машиностроение, 1988.- 158 с.

14.Дятлов Г.И. Вероятностные основы моделирования сложных систем. / Дятлов Г.И., Кудрицкий В.Д.// К.: КВВАИУ,1992.–530 с.

REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.

2. Davydov V.S., Increasing the operating efficiency of a functional system: a specialized control vessel - a deep-sea underwater vehicle through the use of high-precision positioning systems, KDAVT. Collection of scientific works "Vodnyi Transport", vol. 2016.-№2(25).-P. 48-53.

3. Bogomya V.I., Ways to improve the efficiency of the functioning of Ukrainian space Earth observation systems. / Bogomya V.I., Davydov V.S., Zagorulko A.N. a.o..// KDAVT. Collection of scientific works "Vodnyi Transport", vol.2010 – №11. –P.5-11.

4. China Shipbuilding Corporation, Maneuvering information for USCG, K3979103, 2004 p. 3;

5. Jasna Prpić-Oršić, Joško Parunov , Igor Šikić, Operation of ULCS - real life, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2014) 6:1014~1023, http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228, pISSN*: 2092-6782*;

7. Zhou, Y.; Daamen, W.; Vellinga, T.; Hoogendoorn, S.P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. Ocean Eng. 2020, 213, 107774;

8. Ming-Chung Fang; Jhih-Hong Luo; Ming-Ling Lee A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. Journal of Ship Research, 2005, https://doi.org/10.5957/jsr.2005.49.2.69, p.69-79.

9. Yasuo Yoshimura, Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion, Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction August, Tokyo, 2005, p. 1-6 c.

10. United Kingdom Hydrographic Office, Mariner's Handbook, Taunton, UK, 2020, p. 103.

11. Nathanael Esnault; Nitish Patel; Jon Tunnicliffe, Steering Induced Roll Quantification During Ship Turning Circle Manoeuvre, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560998, 2021.

12. Frost A., Practical Navigation for Officers of the Watch, Brown, Son & Ferguson LTD., Glasgow, 2023, p. 347.

13. Sirazetdinov T.K., Methods for solving multicriteria problems of synthesis of technical systems. / Sirazetdinov T.K., – M., Mashynostroienie, 1988.- 158 c.

14. Dyatlov G.I., Probabilistic foundations for modeling complex systems. / Dyatlov G.I., Kudritsky V.D. // K.: KVVAIU, 1992 – 530 p.

Davydov V.S., Klindukhova V.M., Lyashko O.V., Liubarets I.O.

ON THE CREATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE MOVEMENT OF LARGE-FORMAT CONTAINER SHIP IN SHALLOW WATER RESTRICTED AREAS UNDER COMPLEX NAVIGATION, HYDROGRAPHIC, AND HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS OF NAVIGATION

The article discusses the problem of ensuring navigational safety for large container ships under complex navigation, hydrographic, and hydrometeorological conditions. The authors point out that the implementation of Electronic Chart and Navigation Information Systems (ECDIS) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has not led to a significant reduction in ship accidents, especially during shallow water operations. Objective factors that significantly complicate the safe navigation of large vessels are considered, including limitations in the operation of the main propulsion plant and navigational characteristics. The presence of a high windage also complicates ship course-keeping. Vessel design features, such as a long stopping distance and the presence of only one propeller shaft, also have a negative impact on their maneuverability and safety. It is noted that GNSS capabilities are underutilized for trajectory correction and real-time navigation tasks. The dimensions of channels and fairways do not always correspond to the sizes of modern vessels, leading to constraints on the maneuverability and the risk of grounding during navigation.

The article proposes an approach to evaluating the indicators of navigational safety for large container ships by developing a mathematical model that would improve their safety in complex conditions. The authors also mention the possibility of using artificial intelligence to automate ship control processes in hazardous situations. The presented mathematical model of the movement of large container ships requires further development and further research and development to improve the safety of navigation for such vessels.

Keywords: *navigation safety, navigation, mathematical motion model, challenging conditions, large-scale, container ship.*

УДК 656.6:159.98 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.05

Сокол А.О.

ЛЮДСЬКИЙ ЕЛЕМЕНТ, ЯК СКЛАДОВА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НЕБАЖАНОЇ ПОДІЇ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ

Ідея статті полягає у з'ясуванні можливості впливу схильності людського елементу до ризику на ймовірність виникнення небажаної події під час експлуатації морського судна членами екіпажу. Враховуючи статистику виникнення небезпек у морській галузі, спричинених людським фактором, авторка статті досліджує причини, пов'язані з психологічними та соціальними якостями фахівців суднової команди, а саме ступень готовності до ризику.

Для визначення ступеня готовності до ризику члена екіпажу морського судна застосовується авторська методика «Діагностика ступеня готовності фахівця морського флоту до ризику виникнення небезпеки». За результатами діагностики зроблено висновок про вплив схильності члена суднової команди до ризиків на виникнення небажаної події. Надійність методики визначено за допомогою розподілу Пуассона.

Фахівці морської галузі працюють відповідно до Конвенції про працю у морському судноплавстві (MLC, 2006) в якій чітко визначені норми праці і виконання робіт на морському судні. У разі виникнення небажаної події застосовується Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (SOLAS 74). Документальна база, що регламентує роботу та поведінку кожного члена суднової команди у будь якій ситуації, та вимагає чіткого її дотримання, впливає на ймовірність бажаної події та дозволяє створити психологічний портрет фахівця морської галузі. Спираючись на отримані результати, авторка статті запропонувала модель поведінки члена суднової команди схильного чи не схильного до ризику.

Ключові слова: *людський фактор, людський елемент, небезпека, небажана подія, ризик, схильність до ризику.*

Постановка проблеми.

Відповідно до статистики бази даних TSB Marine Safety Information System (MARSIS) [1] на людську помилку припадає приблизно 80–85% усіх морських аварій. В середньому з 2014 по 2020 вплив людського фактору складає 89,5% за даними Європейського агентства з морської безпеки EMSA за 2021 рік [2]. Також EMSA представила Річний огляд морських аварій та інцидентів 2023, в якому представлені аварії з 01 січня 2014 року по 31 грудня 2022 року. За цей період відбулося 2500 аварій на суднах, з яких 59,1% аварій спричинені людським елементом [3].

Розвиток судноплавної галузі, створення нових складних технологій для зменшення впливу людського елементу створили навпаки збільшення можливих помилок при виконанні операцій на судні за рахунок некомпетентності, зухвалості, надії на технічні засоби, що доводить безпосередній вплив людського елементу на технічний елемент, тобто, безпосередній зв'язок людина – техніка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

З метою вивчення впливу людського елементу на можливість виникнення небажаної події було проаналізовано джерела та публікації в яких висвітлюється зазначена проблема. У статті Ксао Фей Ма та ін. «Розгадування характеристик використання людського елемента, людського фактору та людської помилки в безпеці на морі» [4] автори роз'яснюють поняття «людський елемент», «людський фактор» та «людська помилка», наводять характеристики цих понять і їх відмінності між собою. С.В. Бикова у своїй статті [5] описує вплив емоцій на схильність до ризику при виникненні небажаної події. Для дослідження впливу схильності до ризику на основі психологічних якостей особистості були проаналізовані психологічні методики [6] та

методи діагностики [7, 8]. Для створення моделі поведінки члена екіпажу судна у випадку виникнення небажаної події скористалися [9, 10, 11].

Мета, основні задачі статті. Розумові здібності, прийняття рішень, робота в команді, відпрацювання навичок в екстремальних умовах – все це логічні ланки для створення бажаних подій на судні під впливом людського елементу. Незалежно від наявності знань і навичок член екіпажу судна може бути схильним або не схильним до ризиків. Чи впливає схильність фахівця судна до ризику на можливість виникнення небезпечної події? Щоб відповісти на це питання необхідно:

- розглянути психологічні характеристики особистості, які можуть впливати або ні на схильність людини до ризику при виникненні небажаної події;
- розглянути компетентності, які здобуваються майбутніми фахівцями під час навчання за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт;
- пов’язати між собою вплив психологічних якостей на відпрацювання певних компетентностей під час небажаної події, яка виникає на робочому місці;
- сформулювати модель поведінки для схильної або не схильної до ризику особистості.

Необхідно зазначити, що член екіпажу судна під час виконанні своїх обов’язків користується чіткими інструкціями відповідно до міжнародних конвенцій і кодексів і не має права їх порушувати.

Викладення основного матеріалу дослідження

У процесі багаторічного спілкування з членами командного складу екіпажу судна було сформовано основні соціально-психологічні якості особистості, які необхідно мати фахівцю морського галузі для успішної професійної діяльності, з метою забезпечення безпечної експлуатації морського судна. Проаналізувавши статистику виникнення небезпек на морі, та враховуючи стандарт спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт [12], отримали відповідність певних якостей фахівців морської галузі компетентностям зазначеним у стандарті (Таблиці 1).

Таблиця 1. Відповідність соціально-психологічних якостей компетентностям фахівців морської галузі

Соціально-психологічні якості	**Компетентності**
1	2
Відповідальність, готовність особистості, здатність до прийняття рішень	Гнучкість мислення (набуття гнучкого способу мислення, який дасть можливість зрозуміти й розв’язати проблеми та задачі, зберігаючи при цьому критичне відношення до установлених наукових концепцій) Знання методів прийняття рішень та уміння їх застосовувати. Розробка та виконання стандартних експлуатаційних процедур, і контроль за виконанням
Розумові здібності	Навики до аналізу та оцінки здійснення безпечної діяльності (прихильність безпеці). Здатність забезпечувати організацію, нагляд та контроль щодо дотримання правил техніки безпеки, безпеки персоналу та судна.

Закінченн табл. 1

1	2
Робота особистості у колективі (я впливаю на колектив, колектив на мене) – моральні якості	Здатність забезпечувати організацію, нагляд та контроль щодо дотримання правил техніки безпеки, безпеки персоналу та судна. Знання проблем управління персоналом на судні та його підготовки. Знання відповідних міжнародних морських конвенцій, рекомендацій та національного законодавства. Уміння застосовувати методи управління задачами та робочим навантаженням. Знання методів ефективного управління ресурсами та вміння їх застосовувати.
Відпрацювання навиків у екстремальних ситуаціях (стабільність у стресових ситуаціях, робота у замкненому просторі, вольові якості, витримка, рівень надійності та виконання професійних обов'язків, рішучість)	Здатність до аналізу та оцінки базових уявлень про основи психології, педагогіки, методології' вищої школи, що сприяють розвитку загальної культури й соціалізації особистості. Дії при аваріях, що виникають під час плавання. Нагляд та контроль за виконанням законодавчих вимог, а також заходів стосовно забезпечення охорони людського життя на морі, охорони та захисту морського середовища. Здатність до аналізу та оцінки базових уявлень про основи психології, педагогіки, методології вищої школи, що сприяють розвитку загальної культури й соціалізації особистості, схильності до етичних цінностей. Розуміння причинно-наслідкових зав'язків розвитку суспільства й уміння їх використовувати в професійній і соціальній діяльності. Уміння обґрунтовувати власну точку зору та висновки, використовуючи основні теорії та концепції у сфері судноводіння. Забезпечення безпеки екіпажу судна й пасажирів та експлуатаційного стану рятувальних засобів та пристроїв, протипожежної системи та інших систем безпеки Використання навичок керівника та організатора

На основі підібраних якостей особистості, характерних для фахівців морської галузі і відповідних компетентностей (табл. 1), з використанням методики [6], та враховуючи що схильність до ризику прямо пропорційна кількості допущених помилок, була розроблена методика «Діагностика ступеня готовності фахівця морського флоту до ризику виникнення небезпеки», яка складається з двадцяти чотирьох питань. Розроблена методика дозволяє виміряти схильність (готовність) до ризику члена екіпажу морського судна в екстремальних умовах, при виникненні небезпеки. У методиці було визначено три ступеня схильності до ризику:

- висока схильність до ризику говорить про не контролюванні дії, самовпевнені реакції;
- низька схильність до ризику говорить про дії з обережністю під час виконання завдань, як правило мають фахівці з досвідом роботи у певній сфері;
- середні (перехідні) результати дослідження ступеня ризику говорять про те що при набутті досвіду роботи фахівець може перейти до групи з низькою схильністю до ризику.

Методика була апробована на групі з 36 осіб серед яких представлені фахівці які займають різні посади членів екіпажу морського судна (матроси, офіцерський склад палубної та машинної команди, старші механіки, капітани) та кадети які вже мають досвід роботи у морі. За

результатами діагностики було виявлено наступне:

- високу схильність до ризику при виникненні небажаної події мають – 22% опитаних;
- низьку схильність до ризику – 50%;
- середні (перехідні) результати – 28%.

Статистична похибка вимірювань не перебільшує 3,6%.

Отриманий розподіл вкладається в розподіл Пуассона, що дає можливість стверджувати про те що отриманий в ході апробації методики результат з великою вірогідністю буде давати такій же розподіл і для значно більших груп опитуваних.

Отриманий результат діагностики показує що більше п'ятої частини опитаних (22%) мають високу схильність до ризику.

З одного боку цей результат не є занадто високим, і можемо стверджувати, що основною причиною виникнення небезпек у морі з причини людського фактору не є схильність до ризиків членів екіпажу морського судна.

З іншого боку, якщо врахувати те, що лише одна помилка може призвести до втрати живучості судна, то 22% є досить високий відсоток можливості виникнення небезпек. Тому необхідно розуміти у якій ситуації може виникнути небажана подія з причини фахівця схильного до ризику. З метою розуміння поведінки члена екіпажу морського судна схильного до ризику необхідно створити модель його поведінки у випадку ризику виникнення небажаної події.

У моделі поведінки члена екіпажу морського судна схильного до ризику у випадку ризику виникнення небажаної події будемо вважати що першочерговим фактором, який впливає на людський елемент є емоційний стан [5]. На підставі досліджень [5] встановлено, що найбільш схильні до ризику особи з домінуванням емоції «гнів», менше – особи з емоцією «радість», ще менше –«печаль», і, нарешті, особи, в яких домінує «страх», найменш схильні до ризику. Таким чином, можна встановити наступний зв'язок (рис. 1)

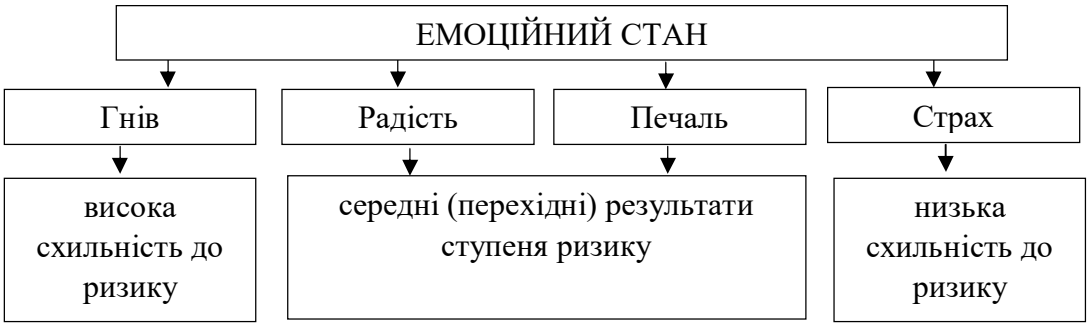


Рисунок 1 – Зв'язок емоційного стану і ступенів ризику

Модель поведінки члена екіпажу морського судна схильного до ризику у випадку ризику виникнення небажаної події будемо створювати для емоцій, які породжують високу та низьку схильність до ризику.

Для створення моделі поведінки будемо розглядати емоцію з психологічної та фізіологічної позицій. Із загальної психології відомо, що емоції сприяють ухваленню рішень [9], і виступають, як захисні реакції організму людини. Людина переживає небажану подію на яку реагує певними емоціями, які за собою несуть певні фізіологічні зміни в її організмі.

Під час переживання емоції «страх» людина переживає стан боязкості і стан побоювання (розумовий страх). [9] Обидва стани дають можливість замислитись над небажаною подією, яка виникла і почати діяти. Реакція на «страх» може викликати відмову від виконання завдання [9], тому, «страх» спричиняє низьку схильність до ризику. Фізіологічні ознаки емоції «страх»: утруднення рухової активності; бліде обличчя (кров відливає від голови); холодний піт; утруднення мови («ком у горлі») [11].

При переживанні емоції «гнів» людина стає роздратованою, відчуває розчарування,

негативний афект [9], що може призвести до неконтрольованого бажання ризикувати. З іншого боку, у стані емоції «гнів» мобілізуються сили для активізації самозахисту, що надає людині можливість проаналізувати, що саме спровокувало небажану подію, оцінити реальні факти й вирішити, як краще діяти в цій ситуації [13]. Тобто, в даному випадку людина свідомо йде на ризик і впевнена, що її дії вірні.

На фізіологічному рівні людина яка відчуває «гнів» виявляє наступні ознаки: увага людини сконцентрована і звужена; обличчя приймає характерний вираз, який служить для оточуючих попереджувальним знаком. Найбільш яскраві зовнішні фізіологічні ознаки «гніву»: підвищення голосу, стиснуті кулаки, надмірна ходьба, стиснута щелепа [10].

На підставі зазначених психологічних факторів і фізіологічних змін, які переживає людина у випадку виникнення небажаної події, запропоновано модель поведінки члена екіпажу судна під впливом емоцій «страх» і «гнів» (рис. 2)

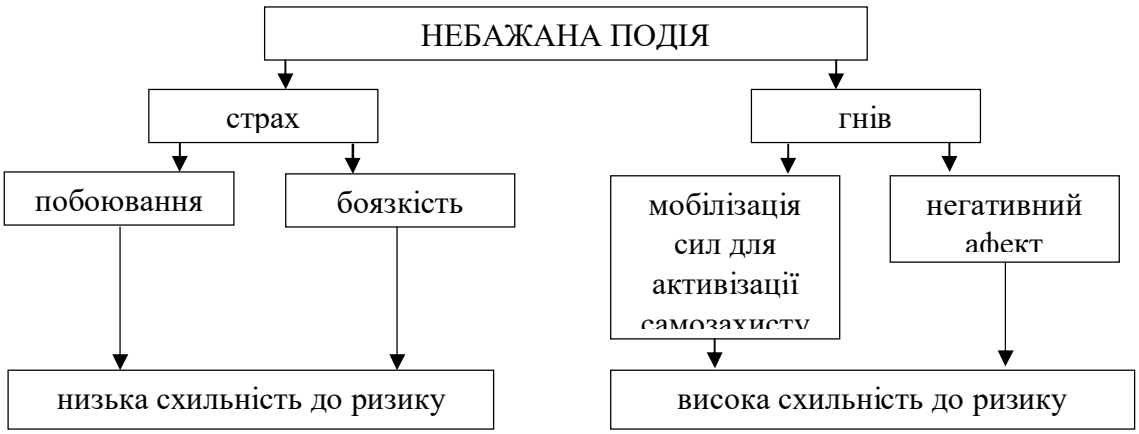


Рисунок 2 – Модель поведінки члена екіпажу морського судна схильного до ризику у випадку ризику виникнення небажаної події

Висновки. Врахувавши психологічні характеристики особистості, які можуть впливати на схильність її до ризику та пов'язавши ці характеристики із компетентностями членів екіпажу морських суден, було з'ясовано, наступне:

- високу схильність до ризику при виникненні небажаної події мають – 22% опитаних;
- низьку схильність до ризику – 50%;
- середні (перехідні) результати – 28%.

Одержані результати говорять про те, що схильність члена екіпажу судна до ризику при виникненні небажаної події не пов'язана з кількістю небажаних подій, які відбуваються на морському транспорті з вени людського фактору.

Психологічні емоції «гнів» і «страх» впливають на схильність членів екіпажу судна до ризику при виникненні небажаної події. При чому, члени екіпажу судна, які після виникнення небажаної події відчувають боязкість діяти у ситуації, «страх», впадають у ступор – мають низьку схильність до ризику. Члени екіпажу судна, яким притаманна емоція «гнів», навпаки, активізують свої зусилля, починаючи діяти, можуть допускати необмірковані вчинки – мають високу схильність до ризику.

По зовнішнім, фізіологічним характеристикам можна зрозуміти, яку емоцію відчуває член екіпажу судна, та використати цю інформацію для попередження невірних дій під час виникнення небажаної події на судні.

Враховуючи вищезазначене добігаємо висновку про необхідність відшукувати інші компоненти людського фактору, які можуть стати причиною виникнення небажаної події.

ЛІТЕРАТУРА

1. Marine transportation occurrences in 2021. URL: https://www.tsb.gc.ca/eng/stats/marine/2021/ssem-ssmo-2021.html (дата звернення: 25.10.2023).
2. Accident Investigation Publications. URL: http://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview.html (дата звернення: 25.10.2023).
3. EMSA: Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023. URL: https://safety4sea.com/emsa-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2023/ (дата звернення: 25.10.2023).
4. Xiao Fei Ma, Guo You Shi, Zheng Jiang Liu. Unraveling the Usage Characteristics of Human Element, Human Factor, and Human Error in Maritime Safety. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/2850 (дата перегляду:03.11.2023).
5. Бикова С. В. Специфіка схильності до ризику в осіб з різним типом емоційності. Наука і освіта: наук.-практ. журнал. 2012. № 6. С. 41-45.
6. Кокун О.М., Пішко І.О., Лозінська Н.С., Копаниця О.В., Малхазов О.Р. Збірник методик для діагностики психологічної готовності військовослужбовців військової служби за контрактом до діяльності у складі миротворчих підрозділів: Методичний посібник. К.: НДЦ ГП ЗСУ, 2011. 281 с.
7. Probability elicitation for Bayesian networks to distinguish between intentional attacks and accidental technical failures. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214212623000819 (дата звернення: 07.11.2023).
8. An Expert System for Optimizing the Operation of a Technical System. URL: https://doi.org/10.1108/JQME-05-2020-0033 (дата звернення: 07.11.2023).
9. Варій М. Й. Загальна психологія.: підр. [для студ. вищ. навч. закл.– 3-тє вид.]. К.: Центр учбової літератури, 2009. 1007 с.
10. Riccardo Williams. Anger as a Basic Emotion and Its Role in Personality Building and Pathological Growth: The Neuroscientific, Developmental and Clinical Perspectives. URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.01950/full (дата перегляду: 07.11.2023).
11. Косолапов О.М. Особливості прояву та співвідношення параметрів страху на різних рівнях його протікання. Проблеми екстремальної та кризової психології (збірник наукових праць). НУЦЗУ, 2012. Випуск 12, ч.1 URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1324 (дата перегляду: 08.11.2023).
12. Стандарт вищої освіти України. Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти. Галузь знань - 27 Транспорт, спеціальність - 271 Річковий та морський транспорт. URL: https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/2022/Standarty.Vyshchoyi.Osvity/Zatverdzheni.Standarty/01/31/271-Richk.ta.morsk.transp-bak.31.01.22.pdf (дата звернення: 03.11.2023).
13. Чому злитися - це нормально і навіть корисно. URL: https://childdevelop.com.ua/articles/psychology/9579/ (дата звернення: 10.11.2023).

Sokol A.

THE HUMAN ELEMENT AS A COMPONENT OF RISK OCCURRENCE OF AN UNDESIRABLE EVENT ON BOARD A SHIP

The idea of the article is to find out the possibility of the influence of the human element's tendency to risk on the probability of an undesirable event occurring during the operation on board a vessel by the ship's crew. Taking into account the statistics of the occurrence of hazards in the maritime industry caused by the human factor, the author of the article investigates the reasons related to the psychological and social qualities of ship's crew, in particular the degree of readiness for the risk of danger.

The author's method "The diagnostics of the degree of ship's crew readiness to the risk of danger" is used to determine the degree of risk readiness of a crew member on board a ship. The conclusion relating to the influence of the ship's crew member's predisposition to risks on the occurrence of an undesirable event was made on the base of the results of the diagnostics. The reliability of the method is determined using the Puasson distribution.

The maritime industry specialists work in accordance with the Maritime Labor Convention (MLC, 2006), that clearly defines the work operation norms on board a ship. The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS 74) is applied in case of undesirable event occurrence.

The documentary base, which regulates the work and behavior of each member of the ship's crew in any situation, and requires its strict observance, affects the probability of the desired event and allows to create a psychological portrait of maritime industry specialist. Based on obtained results, the author of the article has proposed a model of the behavior of a member of the ship's crew prone to or not prone to risk.

Key words*: human factor, human element, danger, undesirable event, risk, prone to risk.*

УДК 692.122.22 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.06

Kalinichenko Y., Zaiets A.

CONCEPTS OF THE DEVELOPMENT OF A CIVIL NETWORK SYSTEM OF UNDERWATER TRAFFIC CONTROL

The article examines the development of underwater space in the interests of maritime freight transport as such, which increases the carrying capacity of existing sea transport routes, increases energy efficiency and reduces the risks of freight transport, provided there is no negative impact on the movement of the vehicle by wind, surface waves and drift currents. It is proposed to create an extensive system of cargo transportation in the underwater space as an alternative to conventional shipping. The best underwater data exchange in terms of speed and volume of transmitted information is provided by laser methods. In second place is radio communication in the microwave range and in third place is the hydroacoustic communication channel. Thus, underwater data transmission based on lasers and radio waves is effective for data transmission only in conditions where the underwater transport vessel moves in the near-surface layer of the ocean. In the future, hybrid data exchange systems will be created under water, based on the physical principles of data transmission by radio, laser, hydroacoustic communication. Hybrid communication systems based on hydroacoustics and radar are not excluded.

Keywords: *Underwater space, underwater vehicles, hydroacoustic, navigation, cargo transportation.*

Introduction

The doctrine of transportation by sea transport is to reduce the cost price. Conceptually, the specified doctrine is ensured by savings on the construction and engineering maintenance of highways and railways. Sea routes do not exclude land area from use. An additional resource of sea transport is the ability to transport cargoes that are extremely large in volume and weight. The advantage of sea transport is the absence of settlements along the shipping routes, which allows for the safe

transportation of explosive, chemically aggressive and radioactive cargoes for the population. The use of the transport resource of the sea underwater space logically fits into the concept of the implementation of the world maritime transport doctrine. Movement under water does not depend on weather conditions, therefore it is safer and has less energy consumption.

The creation of an extensive network of cargo transportation in the underwater space, as an alternative to conventional shipping, will first of all be implemented by ensuring traffic in certain directions, that is, along underwater shipping lanes. In the open ocean, that is, at depths of more than 200 meters, traffic can be additionally organized along appropriate corridors, that is, in different directions in a certain range of depths. Thus, the analogue of the 3D cargo transportation system in the underwater space is the aircraft transport system.

Presentation of the main material. Unlike cargo transportation by land, rivers and air, where there are practically no conflicts, sea surface and underwater transportation routes conflict for space in shallow water areas. In deep-water areas, there is enough space for movement on water and under water, but the noise of ships on the surface of the ocean has a negative effect on the hydroacoustic field of the ocean. Broadband noise from shipping is an obstacle for underwater hydroacoustic information systems. Under water, noise negatively affects data exchange, traffic control, positioning, automatic identification of vessels, and the operation of SOFAR-type "Sound Fixing and Ranging" systems [1]. Broadband shipping noises have the maximum impact on the future prospects of introducing non-linear frequency modulation communication into information hydroacoustics, which prevents the negative impact of multipath sound propagation. [2].

Unlike conventional shipping, the sufficient efficiency of traffic control in the underwater space is due to the still unsolved tasks of providing reliable communication, precessional positioning, identification of submarines, warning of navigational obstacles. It should be noted that traffic management of the future system of underwater transport corridors will be created taking into account the modern experience of developed maritime countries. First of all, this is the experience of building the information layer of the network-centric system of underwater warfare (underwater positioning and underwater communication) and the sensor layer (illumination of the underwater situation, recognition of underwater targets). The implementation of the mentioned military experience into the civilian system will not be burdened by the specific problems of covert and anonymous use of underwater positioning and communication, may not meet the requirements of invulnerability to means of destruction, may not have a system of recognition of "home-foreign". The engines of underwater vehicles should not be silent, the hydrodynamics of the hull should not provide extremely high speed, and their hull should not be designed for diving to a depth of 6000 m.

Due to this, the cost of civilian underwater vehicles will be many times lower compared to submarines. It should be noted that the civil system of ensuring the control of the movement of underwater vehicles, unlike the military system, can use a wider range of physical principles of work, methods and means. It is mistakenly believed that in the conditions of the impossibility of radar and video surveillance in underwater space, the problem of navigational safety of ships is very acute. The large number of submarine collisions with each other should not be alarming, because the reason for these incidents is the noiselessness of their movement. Preventing the collision of underwater vehicles is solved very simply and effectively by installing on them hydroacoustic beacons in the sound range of 1-20 kHz with a range of up to 10-15 km. In addition, the installation of an acoustic beacon with an individual acoustic signature on each vehicle will ensure the operation of the underwater AIS segment.

The means of identification of underwater moving objects are considered by the authors of the work, which describes the tactical and technical characteristics of an AIS-type system that can simultaneously track several underwater objects with the necessary spatial and temporal resolution, demonstrating a realistic trajectory of movement [3]. The acoustic tracking system, designed for long-term tracking, thanks to the solar panel and is based on the principle of trilateration. The algorithm of the difference in the arrival time of the acoustic signal is used to determine the 2D/3D location of the moving object (three receivers provide 2D positioning, and four - 3D positioning). It should be noted that the creation of an extensive system of cargo transportation in the underwater space, in terms of

traffic control, requires the development and implementation of the so-called information and sensor layers - permanent network infrastructure - along shipping routes. This is due to the fact that the existing systems of radio communication and satellite geodesy do not work in the underwater space, or have significant limitations. An analogue of the civilian system that will need to be created is a military network-centric navigation and communication system (Fig. 1), which was put into service in the US Navy in 2005 [4].

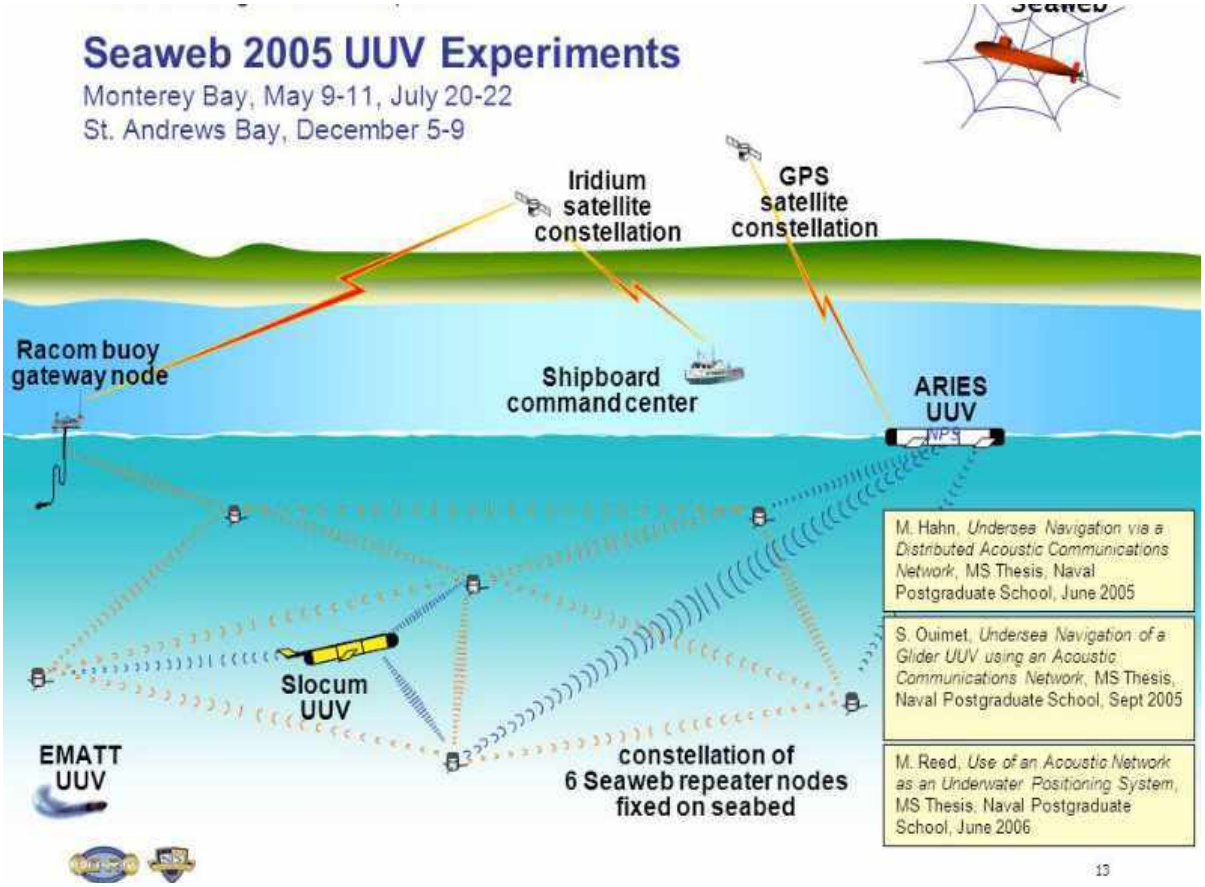


Figure 1: Scheme of bottom infrastructure of underwater positioning

Control of movement in the underwater space is connected with informational and sensory provision of situational awareness of the artificial intelligence of an autonomous unmanned underwater vehicle: own current coordinates; the coordinates of surrounding vessels, which are a navigational hazard and are determined based on the data of the vehicle's own active hydroacoustic system; communication, to transmit commands and exchange data between the underwater vehicle and the shore traffic control center. The coastal center for controlling the movement of ships in the underwater space needs to be provided with data on: current coordinates of the submarine according to AIS data; the current technical condition of the vessel and its navigation equipment. Providing underwater communication and positioning is solved by several methods. In underwater space, hydroacoustics dominates, because the range of propagation of radio and optical electromagnetic waves is limited to the first tens of meters. The minimum range of hydroacoustic communication is 1-2 km, and in deep-sea areas, if there is a hydroacoustic waveguide, it exceeds 100 km [5].

In hydroacoustics, data exchange is carried out only in the sound and infrasound frequency ranges, because ultrasound propagates anisotropically and over a distance of no more than 1 km. In hydroacoustics, data exchange has significant limitations on the speed of communication and volumes of transmitted information, which is associated with many external influences. An internal negative impact is the speed of sound propagation, which is hundreds of thousands of times smaller than the

speed of electromagnetic waves. The modern technical level of the speed of hydroacoustic communication and the volumes of transmitted information are sufficient for the successful control of the movement of underwater vehicles, that is, for the exchange of navigational information and the transmission of commands.

Theoretically, calculating the arrival time of the signal from the source to the receiver is extremely difficult. This is due to the fact that the trajectories of acoustic rays are strongly transformed on the complex topography of the bottom and that the sound wave, moving from one horizon to another, changes the speed of movement in accordance with the VSSD. Errors in distance measurement by acoustic methods should not be considered significant, depending on the paths along which the acoustic signal propagates and on changes in the speed of sound along these paths. The maximum error can be up to 3±0.3%.

Negative external influences include the refraction of acoustic waves (curvilinear propagation of acoustic rays in water). The main negative effect of refraction on the positioning and communication of hydroacoustic data under water is multiradiation, an underestimated range, bearing error, and the presence of acoustic shadow zones. [6].

Due to acoustic shadow zones, signal transmission may not occur between the transmitter and receiver installed at a certain distance and at a certain depth, which disrupts communication and underwater positioning. We will immediately say that the specified problem is solved both mathematically and technically. Technically, this problem is solved by using a vertical antenna array instead of one acoustic receiver on the seabed. The characteristics of the vertical antenna array are known. For data exchange at a frequency of 10 kHz, the distance between the hydrophones should be 1.5 m, which corresponds to 10 λ (where λ is the length of the acoustic wave) based on the frequency of 10 kHz [5].

The mathematical solution consists in calculating the spatial position of the acoustic shadow zones, ranging and bearing errors. The calculation algorithm is known. In the work [7] sonograms from sound sources placed in the conditions of the real relief of the seabed are given. It is shown that circles of an acoustic shadow with radii of approximately 7 and 15 km are created around the source of the acoustic signal (Fig. 2).

The spatial position of the acoustic shadow zones depends exclusively on the features of the vertical distribution of sound speed in water. The vertical distribution of sound speed is determined by measurements, but it is very difficult to do technically. Another solution is the use of the acoustic tomography method. Our department conducts research in this direction. The latest article published in the direction of acoustic tomography has a title «Acoustic tomography algorithm for determining the spatial isotropicity of the hydroacoustic field» DOI:10.20998/2413-4295.2022.03.07.

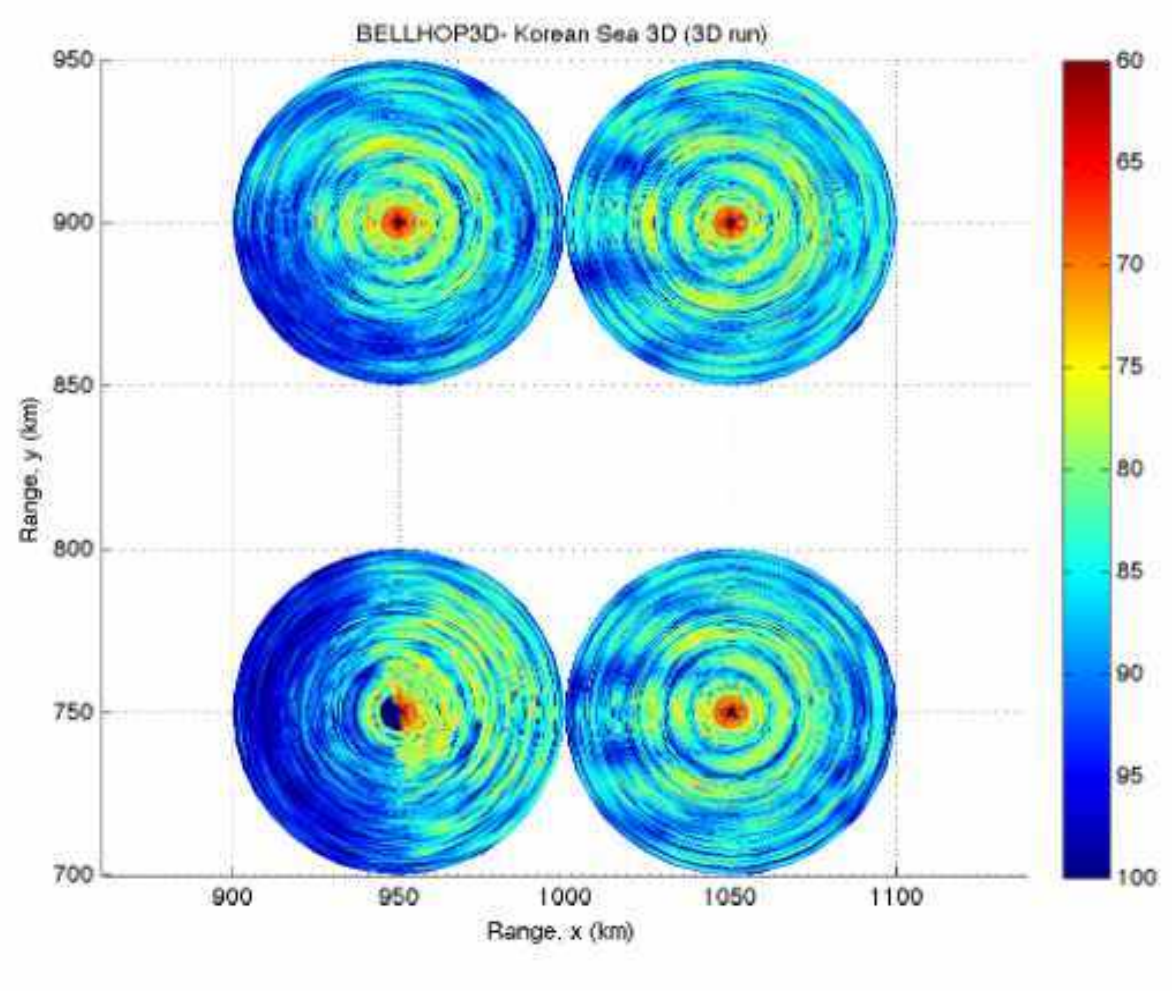


Figure 2: Scheme for calculating spatial losses of an acoustic signal

One of the primary characteristics of the marine environment is the speed of sound, which very sensitively reflects its smallest changes. Moreover, this characteristic is integral, integral. It inseparably characterizes the state of the system, which is formed by a whole complex of influences and reactions to them. By separating the effects and reactions on the so-called temperature, salinity, pressure, known to us at this stage of the development of the physics, we supposedly simplify the system and its understanding, but in fact we get confused, giving one of the factors very great or very little importance (the possibilities of influence on system). Acoustic tomography is based, among other things, on the sound irradiation of the marine environment and the analysis of the received signal for the purpose of evaluating changes in its characteristics after passing through the water space. Changes in the characteristics of the acoustic signal can occur for annual reasons, one of which is spatial changes in the vertical distribution of sound speed. As a result of theoretical research in the direction of passive acoustic tomography, using the methods of modeling the refraction of acoustic waves, a new type of quantitative characteristics of the acoustic field was determined for the first time. The principle of determining the appropriate reference characteristic of the acoustic field is proposed, on the basis of which the basis for creating algorithms for restoring the vertical distribution of sound speed is developed. The algorithm for determining the reference characteristic, including, includes the calculation of acoustic energy losses, which is translated into the frequency domain to determine the positive extremum of the amplitude spectrum and the calculation of the reference characteristic of the regional acoustic field in the time domain. One of a number of algorithms for determining the spatial isotropy of the vertical sound speed distribution has been adapted. The implementation of the specified

algorithm of passive acoustic tomography will provide ship sonar with input data for depth determination, which will increase the safety of navigation.

In this way, the technologies for determining the spatial characteristics of the sound speed distribution have been developed and are continuously being improved. Analysis of volume refraction calculations allows to determine periodic manifestations of acoustic shadow zones. Circles with good (red color) and bad (blue color) transmission of the acoustic signal are formed by the isotropic sound speed field. blue «spots» – zones of poor acoustic signal transmission are formed by the isotropic component of the sound velocity field. Sectors of no acoustic signal transmission are formed by the interaction of the acoustic field and the topography of the seabed. In Fig. 3 shows the scheme for calculating the trajectory of acoustic rays propagating in the direction of the continental slope [7]. The given calculation scheme explains why in Fig. 2, zones of sector-type acoustic shadow appear around the emitter of the acoustic signal.

That is, the coordinates of the zones of the acoustic shadow can be determined by calculations. Under the conditions of refraction of acoustic rays in the horizontal plane, bearing determination errors occur. It also happens in areas with significant slopes of the seabed. [7, 8].

3D acoustic fields are calculated as a function of bathymetry and vertical distribution of sound speed to choose the optimal arrangement scheme for underwater communication and underwater positioning. The mathematical apparatus and software have already been developed [9, 10].

The effectiveness of the deployment of the data exchange system is evaluated in terms of reliability and the area covered by the network of stations [11].

In the article [5] gives an example of the deployment of an underwater hydroacoustic data exchange network with an area of approximately 500 km2 (Fig. 4). The diagram shows the acoustic relay network of underwater communication, consisting of 100 stations.

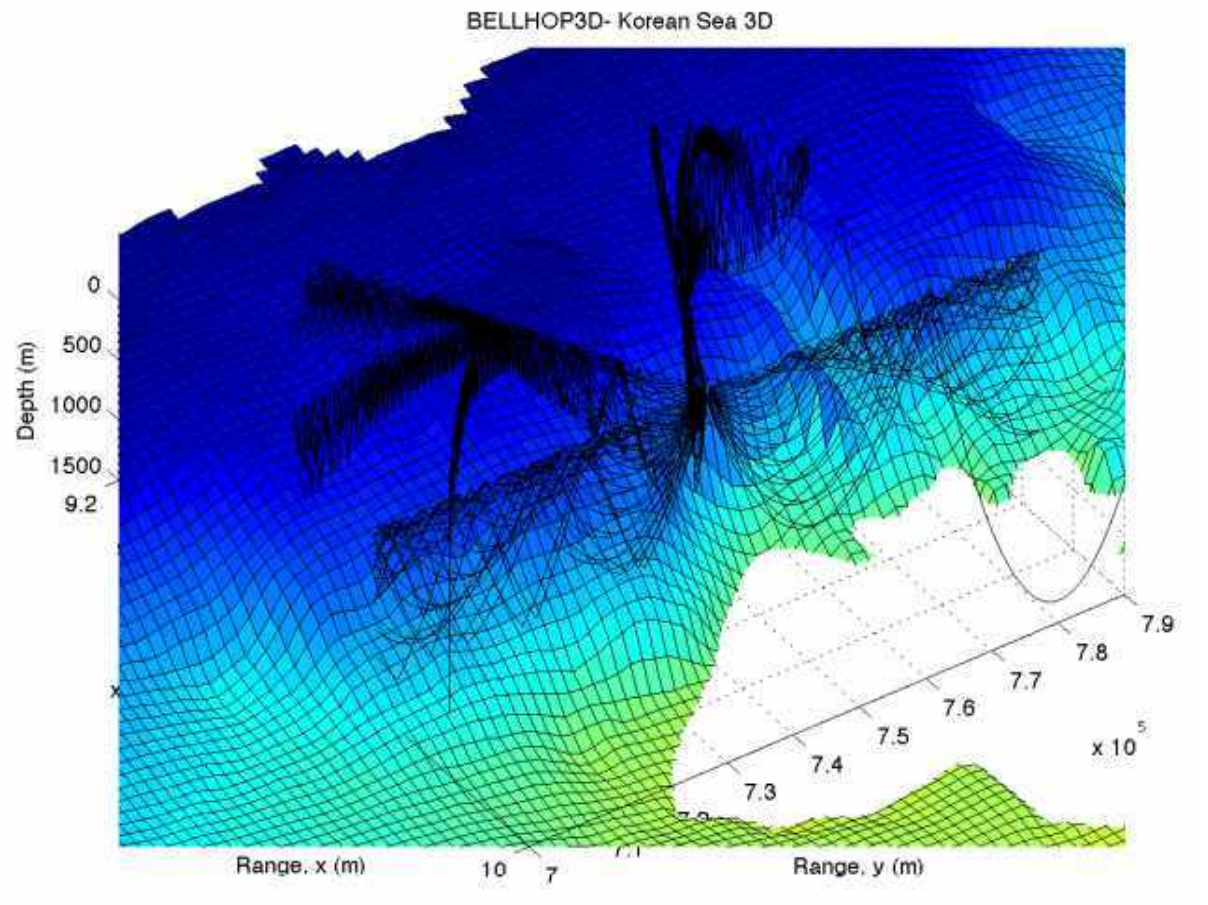


Figure 3: Scheme for calculating the trajectory of acoustic rays propagating in the direction of the continental slope

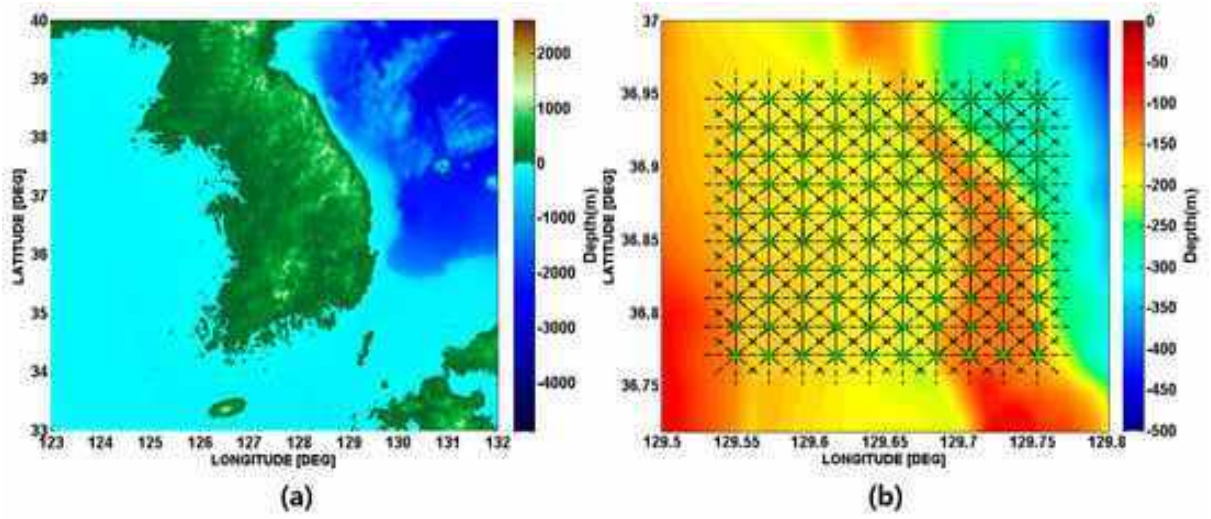


Figure 4: The map and scheme of the acoustic relay network of underwater communication, as the basis of mathematical modeling

Acoustic rays are distributed between stations in accordance with the calculation scheme shown in Fig. 5.

Fig. 5 shows the results of calculations of acoustic ray trajectories.

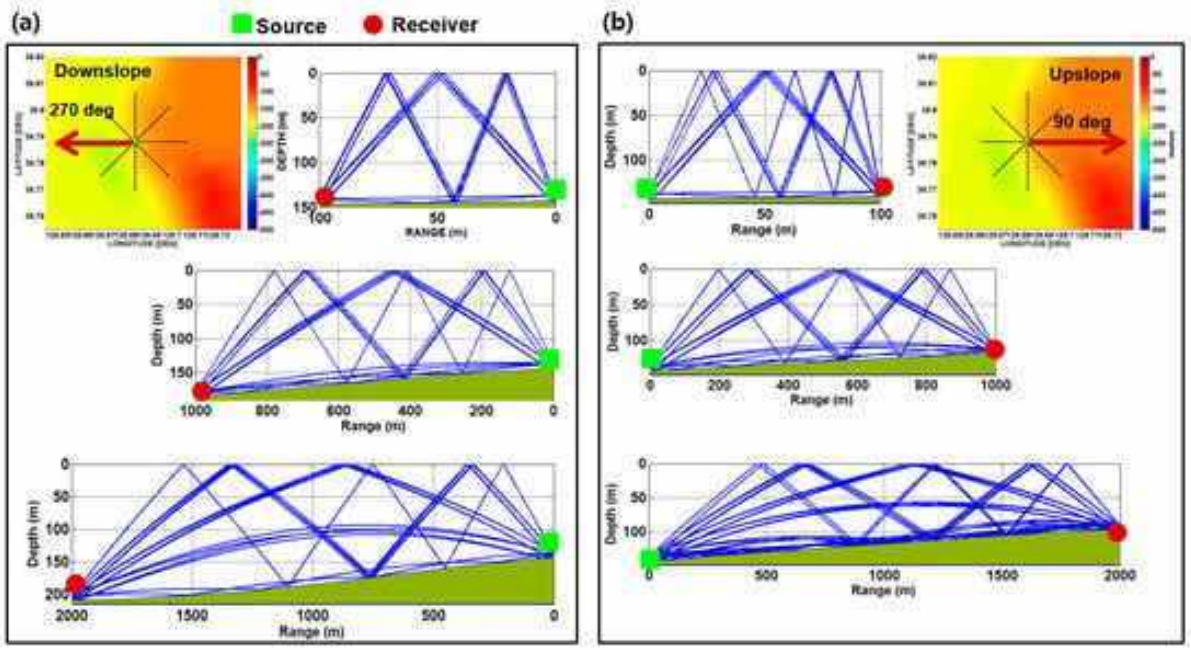


Figure 5: Results of calculations of acoustic ray trajectories for azimuthal angles (a) 90°° and (b) 270°

In Fig. 5 shows that the underwater acoustic communication channel is time-varying. In addition to the distortion of acoustic signal beams due to refraction, multibeam is generated by the formation of numerous interactions of sound with the surface and seabed. This is especially evident in shallow water. Multipath slows communication by creating a delay in sound propagation. In addition, an acoustic signal whose characteristics change along the propagation path leads to the Doppler effect, which is associated with an increase in the dispersion of changes in the frequency of the acoustic signal. Due to sound reflection from the bottom and surface, the distance measured by acoustic methods is always greater than the actual distance. This effect should not be overestimated. Theoretically, it is very difficult to calculate the arrival time of the signal from the source to the receiver. This is due to the fact that the trajectories of acoustic rays are strongly transformed on the complex relief of the bottom and that the sound wave, moving along the trajectory of its own movement, changes the speed of movement. The measured distance errors by acoustic methods, depending on the trajectories along which the acoustic signal propagates, and on changes in the speed of sound along the specified trajectories, can be up to 3±0.3%.

Thus, it can be stated that some problems of underwater communication are solved by technical means, some are taken into account by mathematical modeling. Some problems have not been solved and there are limitations in the propagation of an acoustic signal under water. Such limitations are determined by determining the bit error rate (BER). In Fig. 6 shows an example of BER changes as a function of range. A BER exceeding 2% is used as a criterion for the maximum permissible communication error.

The Figure 6 shows that the determination of the range of the communication relay station is calculated by determining the intersection of the actual constant BER value with a threshold value of BER of 2%.

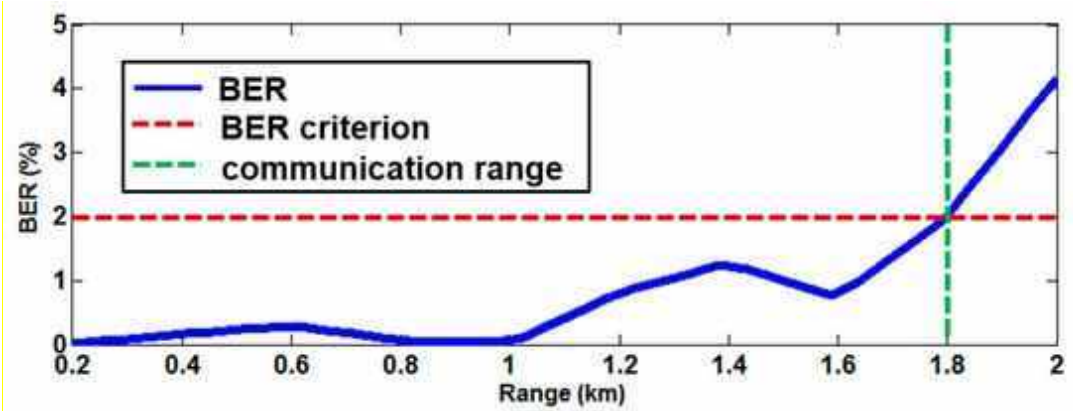


Figure 6: Example of BER variation as a function of range

A reliable data exchange system requires real-time communication with high data rates and low error rates. In Fig. 7 shows the simulation results of the optimal deployment of the underwater data exchange network for two different seasons. Certain quantitative characteristics are defined. The distance between each sensor node and its neighboring sensor nodes corresponds to the minimum communication threshold. The level of communication coverage for February was estimated at 85.2%, which is higher than in August (estimated at 80.6%).

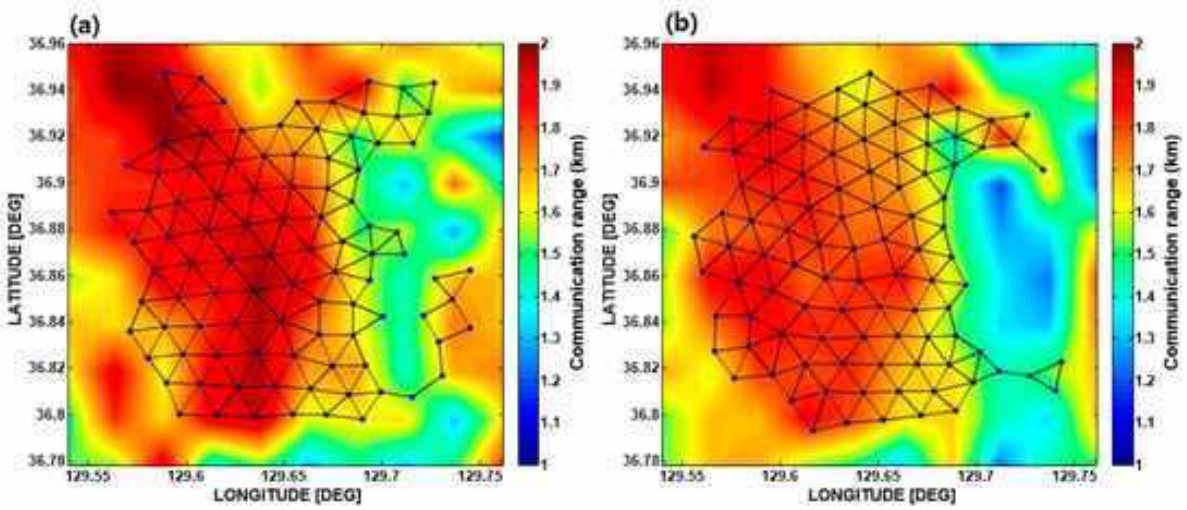


Figure 7: Simulation results of the optimal deployment of an underwater data exchange network using 100 sensor nodes

In the future, hybrid data exchange systems will be created under water, based on the physical principles of data transmission by radio, laser, hydroacoustic communication. Hybrid communication systems based on hydroacoustics and radar are not excluded. Prospects for the creation of hybrid acoustic and electromagnetic systems are considered in the work [12]. In principle, data exchange in the interests of ship control and positioning can be carried out by acoustic (mechanical) waves in the sound frequency range, lasers (coherent electromagnetic waves) in the optical wavelength range of 400-600 nm, and radio waves at frequencies of 30–300 MHz. The results of the comparison of the specified underwater communication technologies are given in the Table 1.

Table 1
The results of the comparison of the specified underwater communication technologies

Parameter	Acoustic	RF	Optical
Attenuation	Distance and frequency dependent (0.1–4 dB/km)	Frequency and conductivity dependent (3.5–5 dB/m)	0.39 dB/m (ocean) 11 dB/m (turbid)
Speed	1500 ms^{-1}	2.3×10^8 ms^{-1}	2.3×10^8 ms^{-1}
Data Rate	kbps	Mbps	Gbps
Latency	High	Moderate	Low
Distance	more than 100 km	<10 m	10-150 m (500 m potential)
Bandwidth	1kHz–100 kHz	MHz	150 MHz
Frequency Band	10–15 kHz	30–300 MHz	5×10^{14}Hz
Transmission Power	10 W	mW–W	mW–W

The best underwater data exchange in terms of speed and volume of transmitted information is provided by laser methods. In second place is radio communication in the microwave range and in third place is the hydroacoustic communication channel. Thus, underwater data transmission based on lasers and radio waves is effective for data transmission only in conditions where the underwater transport vessel moves in the near-surface layer of the ocean. The advantage of data transmission in the radio range is that, unlike laser and acoustic methods, radio waves propagate freely through the interface between the ocean and the atmosphere [13].

As an example of the prospect of combining military and civilian technologies, we can cite a possible prospective hybrid of military communication systems "Tactical Underwater Network Architecture" [14], and civil underwater acoustic communication systems [15] and systems of hydroacoustic automatic identification of the movement of underwater targets [3].

The first system, which is an alternative to unreliable hydroacoustic underwater communication, involves the installation of autonomous surface buoys with radio receivers and radio transmitters (surface buoys under water connected by a fiber optic cable) solves the problem of reliable data transmission (traffic control). The second system provides for the installation of sonar devices on surface buoys, which provides protection of the surface system from saboteurs to the underwater vehicle and simplified underwater positioning. The third system involves retrofitting surface buoys with an acoustic vertical antenna array to provide additional underwater hydroacoustic communication of an underwater vehicle with surface radio communication buoys. The fourth system involves the additional use of an antenna array as a noise deflector. the noise direction finder is used as an element of underwater AIS to passively track the trajectory of an underwater vehicle equipped with a hydroacoustic emitter with an individual acoustic signature.

Conclusions. According to the concept of the US Navy codenamed HYDRA (HYDRA– A DARPA-led initiative that calls for a distributed undersea network of unmanned payloads and platforms “trucked in” and deployed from large UUVs.), all problems of logistics in underwater space are already assigned to large unmanned underwater LDUUV apatite [16].

This gives reason to believe that sea transportation of cargo under water will become a reality in the near future. An underwater transport fleet will be built just as quickly. Unlike conventional ships, which are difficult to design, designing a fleet of unmanned underwater vehicles will not take much time, because simplified technologies for the construction of military submarines and LDUUVs will be involved. The tasks of underwater navigation and hydrographic support for cargo transportation, tasks of traffic management, communication, and positioning require a quick solution. Problems related to the safety of navigation in the underwater space need to be solved. The solution to this problem lies in the construction of a system of observation and rescue under water. Certainly the underwater segment of the AIS must be developed and built very quickly. It should be noted that the interdisciplinary State program for the creation of a marine underwater lighting system has been approved and has been operating in Ukraine for several years. The experience of creating bottom network bottom positioning and communication systems based on the hydroacoustic principle of action should be applied in combination with systems operating on other physical principles. Microwave radio communication directly between an underwater vehicle in an underwater position and satellite means of communication certainly has prospects. There are prospects for laser communication, which is unsurpassed in the speed and volume of information transmission and the real time scale.

The most important thing is international cooperation for the purpose of development and adoption of legal and legal documents in the field of maritime freight transportation in underwater space.

REFERENCES

1. Navy Supplement to the DOD Dictionary of Military and Associated Terms (PDF). Department Of The Navy. June 2012. Archived (PDF) from the original on April 15, 2021.

2. Jeongha A, Hyungin Ra, Changhyun Youn, Kiman Kim, Experimental Results of Underwater Acoustic Communication with Nonlinear Frequency Modulation Waveform, Sensors 2021, 21(21), 7194; https://doi.org/10.3390/s21217194.

3. François-Marie Manicacci, Johann Mourier Chabi Babatounde, Jessica Garcia, Mickaël Broutta, Jean-Sébastien Gualtieri, Antoine Aiello. A Wireless Autonomous Real-Time Underwater Acoustic Positioning System, Sensors 2022, *22*(21), 8208; https://doi.org/10.3390/s22218208, https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8208.

4. M. Reed, Use of an Acoustic Network as an Underwater Positioning System, MS Thesis, Naval Postgraduate School, June 2006.

5. Sunhyo Kim and Jee Woong Choi, Optimal Deployment of Sensor Nodes Based on Performance Surface of Underwater Acoustic Communication, Sensors 2017, *17*(10), 2389; https://doi.org/10.3390/s17102389 *https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2389.

6. https://www.iacm.forth.gr/component/quix/92-groups-wave-propagation.

7. Michael B. Porter BELLHOP3D User Heat, Light, and Sound Research Guide July 25, 2016 https://usermanual.wiki/Document/Bellhop3D20User20Guide202016725.915656596.pdf.

8. Комиссарова Н. Н. Горизонтальная рефракция лучей в прибрежной зоне при разных профилях скорости звука, Акустический журнал, 1998, том 44, № 6, с. 801–807 http://www.akzh.ru/pdf/1998_6_801-807.pdf.

9. Akyildiz, I.F.; Pompili, D.; Melodia, T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. Ad Hoc Netw. 2005, 3, 257–279.

10. Garcia-Pineda, M.; Sendra, S.; Atenas, M.; Lloret, J. Underwater wireless ad-hoc networks: A survey. In Mobile Ad Hoc Networks: Current Status and Future Trends; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2011; pp. 379–411.

11. Senel, F.; Akkaya, K.; Yilmaz, T. Autonomous deployment of sensors for maximized coverage and guaranteed connectivity in underwater acoustic sensor networks. In Proceedings of the 38th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Sydney, Australia, 21–24 October 2013; pp. 211–218.

12. Y. Li, S. Wang, C. Jin, Y. Zhang, T. Jiang, IEEE Commun. Surv. Tutor., 2019, 21, 2466-2487, doi: 10.1109/COMST.2019.2897610

13. https://scitechdaily.com/mit-media-lab-researchers-develop-wireless-underwater-to-air-communications.

14. https://nplus1.ru/news/2017/01/12/tuna DARPAtv/YouTube.

15. Mohammad Furqan Ali, Dush Nalin K Jayakody, Yury Chursin, Sonkin Dmitry Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications August 2019 Archives of Computational Methods in Engineering 26(100):1-34 DOI: 10.1007/s11831-019-09354-8 https://www.researchgate.net/publication/335562546_Recent_Advances_and_Future_Directions_on_Underwater_Wireless_Communications.

16. David R. Strachan, Seabed Warfare Week, Center for International Maritime Security MARCH 13, 2018, https://cimsec.org/forwardfrom-the-seabed.

УДК 656. *62.26.524.2* doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.07

Ганношина І.М.

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ПОБУДОВИ ЧАСТОТНИХ (ФАЗОВИХ) ДЕТЕКТОРІВ З ОДНОКАНАЛЬНИМИ АМПЛІТУДНИМИ МОДУЛЯТОРАМИ РІЗНИХ ТИПІВ І ГЕНЕРАТОРОМ ЗСУВУ ДЛЯ КОГЕРЕНТНИХ ДОПЛЕРІВСЬКИХ РЛС СУДНА

Метою статті є розробка пропозицій щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС для системи забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства. Проблема забезпечення безпеки мореплавства є актуальним і складним завданням, що вимагає комплексного підходу. Вирішення цієї проблеми має величезне значення для ефективної діяльності морського транспорту, що є невід'ємною частиною економіки країни. Особливо важливо підкреслити, що ця проблема охоплює різні заходи – нормативні, організаційні, технічні та технологічні. Важливою складовою вирішення завдання безпеки мореплавства та ефективної навігації є застосування технічних засобів судноводіння. Ці засоби відіграють критичну роль як на борту суден, так і в рамках берегової інфраструктури. Вони забезпечують організацію та управління рухом суден, що необхідно для забезпечення безпеки морської навігації. У зв'язку з актуальністю цієї проблеми проводять дослідження, спрямовані на розроблення нових технічних засобів судноводіння і поліпшення характеристик наявних. Застосовувані нині берегові імпульсні радіолокаційні станції недостатньо ефективно розрізняють швидко рухомі морські об'єкти від стаціонарних. У цьому контексті розроблення нових технічних засобів судноводіння на основі доплерівських радіолокаційних систем набуває особливої актуальності. Таким чином, ця наукова стаття досліджує проблему безпеки мореплавства і ролі технічних засобів судноводіння в її вирішенні. Також вона висвітлює напрямки досліджень, спрямованих на вдосконалення наявних систем і розроблення нових для забезпечення надійності навігації та безпеки морського транспорту.

Ключові слова: *безпека мореплавства, технічні засоби судноводіння, ефективність навігації, морський транспорт, технологічний характер, радіолокаційні системи, радіоелектронні системи, навігаційна безпека, засоби водного транспорту, контроль, показники ефективності контролю, технічний стан.*

Постановка проблеми. Вирішення проблеми безпеки мореплавства має величезне значення для ефективної роботи морського транспорту – важливої галузі економіки країни та її економічних зв'язків. Ця проблема є першорядною, комплексною і містить заходи нормативного, організаційного, технічного і технологічного характеру. Однією з найважливіших складових вирішення проблеми безпеки мореплавства та ефективності навігації є застосування технічних засобів судноводіння (ТЗС) як на суднах, так і в рамках берегової інфраструктури, що вирішує завдання організації та забезпечення руху суден. До таких ТЗС, без яких немислиме функціонування сучасного морського флоту, належать суднові радіолокаційні станції (РЛС), засоби автоматизованого радіолокаційного прокладення (ЗАРП), суднові навігаційні автоматизовані комплекси (НАК), берегові системи управління рухом суден (СУРС), радіолокаційні маяки-відповідачі тощо.

У зв'язку зі сказаним вельми актуальними є дослідження, спрямовані як на розроблення нових перспективних ТЗС і методів їхнього застосування, так і на вдосконалення експлуатаційних характеристик наявних приладів і засобів забезпечення безпеки мореплавства. Проведення таких досліджень можливе за різними напрямами.

Сучасні берегові імпульсні РЛС, незважаючи на високий ступінь досконалості, мають основний недолік, що полягає в тому, що вони не здатні відрізнити морські об'єкти, які швидко рухаються, від нерухомих об'єктів і визначати оперативно швидкості та координати траєкторії їхнього руху. Огляд діючих сучасних берегових і суднових РЛС приводить до висновку, що на теперішній час у ТЗС не знаходять застосування доплерівські РЛС безперервної дії та імпульсно-когерентні. Тим часом із появою швидкохідних суден і швидкохідних морських катерів на повітряних подушках, підводних крилах і пластикових катерів глісуючого типу (малогабаритні морські об'єкти) навігаційна обстановка істотно ускладнилася на далеких і ближніх підступах до акваторії порту. У перспективі ця тенденція буде тільки розвиватися. Вирішення цієї проблеми можливе за допомогою когерентних доплерівських РЛС безперервної дії та імпульсно-когерентних, які не знаходять на цей час застосування у ТЗС.

У зв'язку з цим розроблення нових ТЗС на базі берегових когерентних доплерівських РЛС безперервної та імпульсної дії набуває особливої важливості й актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності систем забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства, наприклад, які визначені в роботах [1-8].

Так, у науковому дослідженні [1] детектор фазової частоти (PFD) використовується для виявлення фази в системі фазового автопідстроювання частоти (PLL) і завжди є активним. PFD працює на більш високих частотах і споживає більше енергії. Щоб мінімізувати загальну потужність PFD у цій статті обговорюють проєктування та реалізацію енергоефективного PFD, що працює на вищих частотах. Для зниження енергоспоживання PFD з низьким енергоспоживанням пропонуються такі методи, як логіка прохідного транзистора, адаптивний рівень напруги та видалення шляху скидання. Пропонований PFD працює на частоті до 2 ГГц, тоді як PFD без шляху скидання може працювати і на більш високих частотах. Існуючі та пропоновані PFD з низьким енергоспоживанням було спроектовано та реалізовано з використанням Cadence Virtuoso за технологією CMOS 180 нм і змодельовано за допомогою Cadence Spectre.

У статті [2] описується симетричний фазочастотний детектор (PFD). Симетрична структура PFD забезпечує функції фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з низьким джиттером. Найважливішим моментом під час проєктування ЧФД є увага до їхньої мертвої зони, ступеня їхньої лінійності та частотного діапазону роботи. Оскільки мертва зона схеми фазового детектора менша, ця схема здатна виявляти меншу різницю фаз на високих частотах. У цій статті, враховуючи компроміс між мертвою зоною і максимальною робочою частотою, найвища робоча частота досягається за мінімальної конструкції мертвої зони. Моделювання після компонування технології TSMC 0,13 мкм виконується з використанням технології CMOS: отримані в такий спосіб результати потім порівнюються з наявною літературою. Ці результати вказують на споживану потужність менш як 90 мкВт і частотну характеристику 4,1 ГГц, а також мертву зону менш як 25 пс у гіршому разі: це відповідна умова порівняно з попередніми відповідними роботами. Площа пропонованого симетричного контуру становить 250 мкм^2. Нарешті, запропонований PFD протестовано в системі ФАПЧ, і результати показують, що структура корисна для додатків синтезатора частоти.

У роботі [3] описано аналіз можливості частотного детектування фазового детектора. На основі аналізу запропоновано просту модифіковану реалізацію, що досягає одностороннього набуття частоти. Імовірність появи на виході і коефіцієнт виявлення частоти розраховуються і перевіряються методом моделювання. Криві посилення показують, що запропонований фазово-частотний детектор (PFD) має можливість одностороннього виявлення частоти частот без обмеження діапазону. Ця можливість демонструється шляхом перехідного моделювання годинника та відновлення даних (CDR) на основі PLL, використовуючи запропонований PFD. CDR досягає як фазових, так і частотних придбань, коли початкова тактова частота нижче, ніж швидкість передачі даних. Крім того, отримано плавний перехід від частотно-квентного замикання до фазового.

Метою статті є розробка пропозицій щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС для системи забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства.

Викладення основного матеріалу дослідження. До складу передавального пристрою надмалошумної когерентної доплерівської РЛС безперервної дії, окрім типових вузлів (задавального генератора надвисокої частоти (НВЧ), кінцевого підсилювача НВЧ та передавальної антени), входить запропонований додатковий каскад, призначенням якого є кардинальне зниження (на десятки децибелів) фазових флуктуацій НВЧ-збуджувача, та надмалошумний кінцевий підсилювач НВЧ з компенсатором фазових шумів. Приймальний пристрій містить новий тип надмалошумного приймача фазомодульованих коливань.

До складу передавального пристрою надмалошумної когерентно-імпульсної РЛС входять задавальний генератор НВЧ, згаданий вище надмалошумний додатковий каскад більшої потужності, кінцевий модульований підсилювач НВЧ і приймально-передавальна антена. Приймальний пристрій містить згаданий вище новий тип надмалошумного приймача фазомодульованих коливань.

У статті пропонуються нові частотні (фазові) детектори з амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву, які є ключовими елементами. На їхній основі розробляють і створюють малошумні вузли приймально-передавальних пристроїв когерентних доплерівських РЛС.

Побудова функціональних схем частотних (фазових) детекторів заснована на двох основних принципах:

1. Використання в схемі частотного (фазового) детектора амплітудного модулятора замість гетеродина.

2. Використання прямого і непрямого способів формування опорної напруги фазового детектора.

Застосування першого принципу дає змогу реалізувати частотні (фазові) детектори різних типів: з амплітудним модулятором (АМ), балансним амплітудним модулятором (БАМ) і односмуговим амплітудним модулятором (ОАМ).

Застосування другого принципу призводить до двоканальної схеми частотного (фазового) детектора. Використання в одноканальному і двоканальному частотному (фазовому) детекторі БАМ, як буде показано далі, призводить до компенсації фазових шумів НВЧ-змішувача, які є найбільш інтенсивними його власними шумами.

Використання ОАМ у двоканальному частотному (фазовому) детекторі призводить до компенсації його фазових шумів, оскільки вони синфазно впливають на входи фазового детектора.

Всі зазначені властивості частотних (фазових) детекторів у подальшому використовуються для розроблення та створення високочутливих вимірників частотних (фазових) флуктуацій і частотних (фазових) детекторів, що використовуються в приймально-передавальних пристроях когерентних доплерівських РЛС.

Аналіз флуктуації проводиться квазістатичним методом з урахуванням власних фазових шумів елементів функціональних схем частотних (фазових) детекторів.

Пропозиції щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС судна включають реалізацію таких підходів:

– одноканальний частотний (фазовий) детектор з амплітудним модулятором і генератором зсуву;

– одноканальний частотний (фазовий) детектор із балансним амплітудним модулятором і генератором зсуву;

– одноканальний частотний (фазовий) детектор з односмуговим амплітудним модулятором і генератором зсуву.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор з амплітудним модулятором і генератором зсуву. Функціональну схему розглянутого одноканального частотного (фазового) детектора наведено на рис. 1.

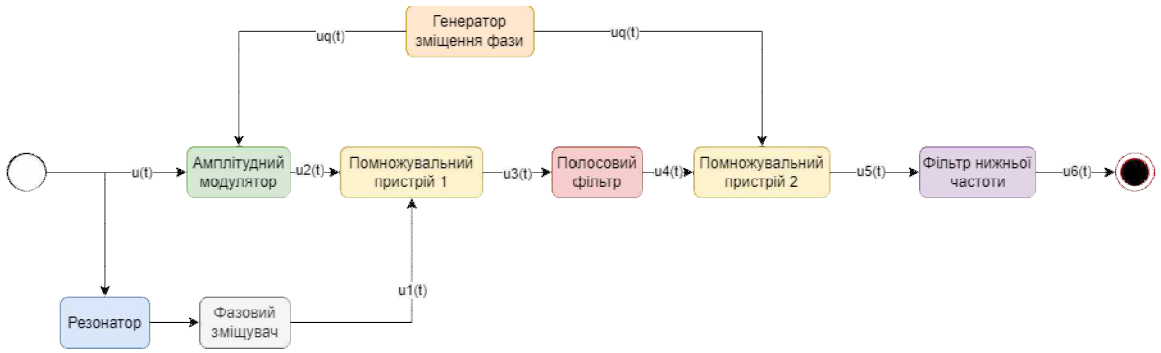


Рисунок 1 – Функціональна схема одноканального частотного (фазового) детектора

На відміну від частотного детектора Паунда розглянутий детектор має гнучкіше конструктивне рішення і вищу чутливість, якщо використовується частотний дискримінатор інтерференційного типу. Тут як гетеродин використовується амплітудний модулятор (АМ) і прямий спосіб формування опорної напруги: опорною напругою є вихідна напруга генератора зсуву (ГЗ). Напруга досліджуваного автогенератора задається виразом

$$u(t) = \cos\left[\overline{\omega}t + \int_{-\infty}^{t} v(t)dt\right], \quad (1)$$

де $\overline{\omega}$ – середнє значення $u(t)$;

$v(t)$ – флуктуації кутової частоти напруги $u(t)$.

Напруга автогенератора надходить через дільник напруги на входи вимірювального резонатора (P) й амплітудного модулятора.

Напруга генератора зсуву задається виразом:

$$u_q(t) = \cos\left[\overline{\omega}t + \varphi_q(t)\right], \quad (2)$$

де $\varphi_q(t)$ – фазові флуктуації ГЗ.

Амплітудний модулятор, на модуляційний вхід якого надходить напруга генератора зсуву, є звичайним БАМ або ОАМ.

Далі під АМ будемо мати на увазі балансний амплітудний модулятор та односмуговий амплітудний модулятор, оскільки шумові властивості детекторів з АМ і БАМ схожі. Тут і далі для стислості амплітуди напруг вважаються рівними одиниці.

З виходу фазообертача напруга $\varphi_l(t)$ з фазовими флуктуаціями $\varphi_v(t)$, перетвореними резонатором із частотних флуктуацій, і фазовим зсувом φ_o, який вноситься фазообертачем Ф, надходить на один із входів змішувача (СМ), який моделюють пристроєм ПУ, що перемножує, та з послідовно ввімкненим смуговим фільтром СФ.

Резонатор (Р) – це пристрій, який посилює сигнал певної частоти. Резонатор працює на основі явища резонансу, коли енергія сигналу підсилюється при певній частоті.

Фазовий зміщувач (Ф) – це пристрій, який змінює фазу сигналу. Фазовий зміщувач може використовуватися для управління фазою сигналу в радіочастотних системах.

Амплітудний модулятор (АМ) – це пристрій, який змінює амплітуду несучого сигналу відповідно до амплітуди модулюючого сигналу. Амплітудний модулятор використовується для передачі інформації шляхом зміни амплітуди несучого сигналу за допомогою модулюючого сигналу.

Генератор зміщення фази (ГЗФ) – це пристрій, який генерує сигнал з постійною частотою та змінною фазою. Генератор зміщення фази використовується в системах зв'язку для модуляції сигналу.

Помножувальний пристрій (ПП) – це пристрій, який множить два сигнали. Помножувальний пристрій використовується в різних застосуваннях, таких як радіочастотні системи, обробка сигналів та комп'ютерна графіка.

Смуговий фільтр (СФ) – це пристрій, який пропускає сигнали певної частоти та блокує сигнали інших частот. Смуговий фільтр використовується для виділення сигналів певної частоти з мішанки сигналів.

Фільтр нижньої частоти (ФНЧ) – це тип смугового фільтра, який пропускає сигнали з частотою нижче певного значення та блокує сигнали з частотою вище цього значення. ФНЧ часто використовується для приглушення шуму та перешкод.

Балансовий амплітудний модулятор (БАМ) – це пристрій, який перетворює сигнал на сигнал з постійною амплітудою та змінною частотою. Балансовий амплітудний модулятор використовується в системах зв'язку для модуляції сигналу.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор із балансним амплітудним модулятором і генератором зсуву. У цьому випадку на функціональній схемі рис. 1 амплітудним модулятором є балансний амплітудний модулятор. Тоді вихідна напруга змішувача визначається виразом

$$u_{zm}(t) \approx u_1(t)u_2(t) = \cos\left[\overline{\omega}_q t - \varphi_o - \varphi_v(t) + \varphi_q(t) + \varphi_{bam}(t) + \varphi_3(t)\right] + \cos\left[\overline{\omega}_q t + \varphi_o + \right.$$
$$\left. \varphi vt + \varphi qt - \varphi bamt + \varphi 3t, \right. \quad (3)$$

де $\varphi_{bam}(t)$ і $\varphi_3(t)$ – флуктуації фази балансного амплітудного модулятора і змішувача.

Напруга різницевої проміжної частоти, що дорівнює частоті генератора зсуву $\overline{\omega}_q$, містить протифазні складові φ_o, $\varphi_v(t)$, $\varphi_{bam}(t)$ і синфазні складові фазових флуктуацій $\varphi_q(t)$ та $\varphi_3(t)$ генератора зсуву і змішувача. В отриманому виразі перший доданок відповідає процесу фазового детектування в околиці робочої точки $+\varphi_o$, а другий доданок – аналогічному процесу в околиці робочої точки $-\varphi_o$ періодичної характеристики фазового детектора. Протифазні вимірювані фазові шуми $\varphi_v(t)$, зумовлені частотними шумами $v(t)$, і протифазні фазові шуми $\varphi_{bam}(t)$ балансного амплітудного модулятора подвоюються, оскільки детектування відбувається на різних схилах періодичної характеристики фазового детектора з протилежним знаком крутості, а синфазні фазові флуктуації змішувача $\varphi_3(t)$ віднімаються на виході фазового детектора (ФД) (щонайменше 20 дБ).

Напруга на виході фазового детектора з урахуванням його власних шумів $u_{fdsh_0}(t)$ записується таким чином:

$$u_{fd}(t) \approx \cos\varphi_0 - \sin\varphi_0\,[\varphi_v(t) - \varphi_{bam}(t)] + u_{fdsh_0}(t). \quad (4)$$

Якщо $\varphi_0 = \pi/2$, то напруга шумів фазового детектора максимальна і прямо пропорційна вимірюваним флуктуаціям фази $\varphi_v(t) \sim v(t)$ і власним шумам вимірювача (фазові флуктуації БАМ і шуми ФД).

Фазові шуми НВЧ змішувача частотного (фазового) детектора не впливають на кінцевий результат вимірювання, оскільки їхні перетворення відбуваються на різних схилах періодичної характеристики фазового детектора, що відрізняються знаком крутизни.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор з односмуговим амплітудним модулятором і генератором зсуву. У розглянутому випадку на функціональній схемі (див. рис. 1) амплітудним модулятором є односмуговий амплітудний модулятор, і перетворення фазових (частотних) флуктуацій відбувається на одному схилі характеристики фазового детектора. Напруга на виході фільтра нижніх частот фазового детектора одноканального

частотного (фазового) детектора з урахуванням тільки однієї бічної складової виражається таким чином:

$$u_{fd}(t) \approx \cos\varphi_0 - \sin\varphi_0\,[\varphi_v(t) - \varphi_{oam}(t) - \varphi_3(t)] + u_{fdsh_0}(t), \qquad (5)$$

де власними шумами вимірювача є шуми фазового детектора $u_{fdsh_0}(t)$, фазові шуми НВЧ-змішувача й односмугового амплітудного модулятора $\varphi_3(t)$ і $\varphi_{oam}(t)$.

Висновки. Таким чином, у статті досліджено механізм фазового детектування в частотному (фазовому) детекторі з БАМ і ГС. Завдяки такому підходу відбувається компенсація власних фазових шумів НВЧ змішувача та підсилювача проміжної частоти. Це має велике значення для створення малошумних приймачів когерентних доплерівських РЛС як неперервної, так і імпульсної дії.

Розроблено пропозиції щодо побудови високочутливих одноканальних вимірювачів частотних (фазових) флуктуації джерел малопотужних НВЧ-коливань. Можливості підвищення чутливості вимірювання, що випливають з нового принципу побудови частотного (фазового) детектора, в якому як основа використовується амплітудний модулятор і частотний дискримінатор інтерференційного типу, дають змогу вимірювати частотні (фазові) флуктуації джерел малопотужних НВЧ-коливань з вихідною потужністю від десятків мкВт до сотень мВт.

ЛІТЕРАТУРА

1. Aneesh Bharadwaj, D., Parashar, V.S., Dhanush, T.N., Premananda, B.S. (2022). Design and Implementation of Phase Frequency Detectors for Low-Power PLL. In: Dhawan, A., Tripathi, V.S., Arya, K.V., Naik, K. (eds) Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 777. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_36.

2. Sofimowloodi, S., Razaghian, F. & Gholami, M. Low-Power High-Frequency Phase Frequency Detector for Minimal Blind-Zone Phase-Locked Loops. Circuits Syst Signal Process 38, 498–511 (2019). https://doi.org/10.1007/s00034-018-0887-4

3. Park, K. and Jeong, D.-K. (2020), Analysis of frequency detection capability of Alexander phase detector. Electron. Lett., 56: 180-182. https://doi.org/10.1049/el.2019.3488

4. M.K. Abdul, J.K. Binsu, Low power, high frequency, free dead zone PFD for a PLL design, in 2013 IEEE Faible Tension Faible Consommation IEEE (2013).

5. A. Tiwari, A review on design and analysis of low power PLL for digital applications. IJRASET 6, 1677–1684 (2018).

6. S.K. Garg, B. Singh, A novel design of an efficient low power phase frequency detector for delay locked loop, in 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (IEEE, 2016).

7. K. Arshak, O. Abubaker, E. Jafer, Design and simulation difference types cmos phase frequency detector for high speed and low jitter PLL, in Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (2004).

8. S. Praseetha, M. Tephila, A.S. Benedict, Implementation of phase frequency detector in phase locked loop using present able modified TSPC D flip-flop. Int J. Innov. Technol. Explor. Eng. 8, 977–980 (2019).

REFERENCES

1. Aneesh Bharadwaj, D., Parashar, V.S., Dhanush, T.N., Premananda, B.S. (2022). Design and Implementation of Phase Frequency Detectors for Low-Power PLL. In: Dhawan, A., Tripathi, V.S., Arya, K.V., Naik, K. (eds) Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 777. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_36.

2. Sofimowloodi, S., Razaghian, F. & Gholami, M. Low-Power High-Frequency Phase Frequency Detector for Minimal Blind-Zone Phase-Locked Loops. Circuits Syst Signal Process 38, 498–511 (2019). https://doi.org/10.1007/s00034-018-0887-4

3. Park, K. and Jeong, D.-K. (2020), Analysis of frequency detection capability of Alexander phase detector. Electron. Lett., 56: 180-182. https://doi.org/10.1049/el.2019.3488

4. M.K. Abdul, J.K. Binsu, Low power, high frequency, free dead zone PFD for a PLL design, in 2013 IEEE Faible Tension Faible Consommation IEEE (2013).

5. A. Tiwari, A review on design and analysis of low power PLL for digital applications. IJRASET 6, 1677–1684 (2018).

6. S.K. Garg, B. Singh, A novel design of an efficient low power phase frequency detector for delay locked loop, in 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (IEEE, 2016).

7. K. Arshak, O. Abubaker, E. Jafer, Design and simulation difference types cmos phase frequency detector for high speed and low jitter PLL, in Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (2004).

8. S. Praseetha, M. Tephila, A.S. Benedict, Implementation of phase frequency detector in phase locked loop using present able modified TSPC D flip-flop. Int J. Innov. Technol. Explor. Eng. 8, 977–980 (2019).

Hannoshyna I.M.

DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE CONSTRUCTION OF FREQUENCY (PHASE) DETECTORS WITH SINGLE-CHANNEL AMPLITUDE MODULATORS OF VARIOUS TYPES AND A SHIFT GENERATOR FOR COHERENT DOPPLER RADAR OF A SHIP

The aim of the article is to develop proposals for the construction of frequency (phase) detectors with single-channel amplitude modulators of different types and a shift generator for coherent Doppler radars for the system of ensuring navigation safety in modern shipping conditions. The problem of ensuring navigation safety is an urgent and complex task requiring a complex approach. The solution of this problem is of great importance for the efficient operation of maritime transport, which is an integral part of the country's economy. It is especially important to emphasise that this problem includes various measures - regulatory, organisational, technical, and technological. An important part of solving the problem of safety of navigation and efficient navigation is the use of technical means of navigation. These aids play a critical role both on board ships and within the shore infrastructure. They provide organisation and control of vessel traffic, which is necessary to ensure safe navigation at sea. Due to the relevance of this problem, research is being carried out to develop new ship navigation aids and improve the performance of existing ones. Currently used coastal pulse radar stations are not efficient enough to distinguish fast moving marine objects from stationary ones. In this context the development of new technical means of ship navigation based on Doppler radar systems acquires special urgency. Thus, this scientific article investigates the problem of navigation safety and the role of technical means of ship navigation in its solution. It also highlights the directions of research aimed at improving the existing systems and developing new ones to ensure the reliability of navigation and safety of maritime transport.

Keywords: *navigation safety, technical means of navigation, navigation efficiency, maritime transport, technological character, radar systems, navigation safety.*

УДК 629.5:620.91 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08

Гончарук І.П., Никифоров Ю.О. Кошарська Л.В. , Головань А.І.

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ І ЕКОЛОГІЧНІСТЬ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Світ стоїть перед викликом постійного зростання споживання енергії. Водночас енергетичні ресурси стають дефіцитними. Незважаючи на раптове значне падіння цін на паливо в усьому світі, дослідницька діяльність, спрямована на зменшення залежності від викопного палива як традиційного джерела енергії, все ще має перевагу в галузі судноплавства. Використання чистих і відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія, наприклад, пропонується як метод підвищення ефективності суден. Судна можуть отримати вигоду від сонячної енергії завдяки тому, що більша частина їх надводної поверхні завжди знаходиться під впливом сонця, особливо в сонячних регіонах. У цій статті обговорюється ефективність і проблеми встановлення сонячних панелей для допоміжного виробництва електроенергії на борту судна. У статті підкреслюється необхідність розвитку інфраструктури відновлюваної енергетики для морського транспорту. Результати опитування, проведеного в рамках цього дослідження, слугують інформацією для розробників державної політики щодо того, якою мірою політика може або повинна намагатися забезпечити керівні принципи і стимули у формуванні ставлення або поведінки галузі щодо застосування відновлюваних джерел енергії. Існує високий ступінь переваги відновлюваних джерел енергії над викопними як для суднових енергетичних установок, так і для домогосподарств. У той час як сонячна енергія є найбільш сприятливим типом енергії для домогосподарств, спалювання водню (80%) є найбільш підтримуваною альтернативою для забезпечення енергією комерційного судноплавства. Паливні елементи є наступною найбільш популярною (64%) альтернативною енергією, яка застосовується на борту суден, на думку представників морської індустрії. Результат також вказує на те, що перевага конкретного типу енергії на борту судна також базується на інших факторах, таких як доцільність, а не на особистих уподобаннях респондентів.

Ключові слова: *морське судно, альтернативна енергія, відновлювана енергія, паливний елемент.*

Постановка проблеми. З огляду на подвійні виклики, пов’язані зі скороченням викидів від викопних видів палива та забезпеченням доступу до чистої та доступної енергії, існує нагальна потреба у переході до низьковуглецевої енергетичної системи та забезпечення доступу до чистої та доступної енергії. Цей перехід повинен враховувати питання енергетичної справедливості, щоб гарантувати, що політика, плани і програми гарантували справедливий і рівний доступ до ресурсів і технологій. Спектр досліджень пропонує критичні перспективи енергетичного переходу, а також інструменти для прийняття рішень та політичних процесів. Кількісні, якісні та змішані методи сприяють нашому розумінню проблем та успішності реагування на них. Дослідження, представлені у цієї статті ілюструють, що сфера «зеленої енергетики» - це сфера, яка швидко розвивається. Відбуваються постійні інновації, що сприяють переходу, з’являються нові процеси та показники для прийняття рішень, а також з’являється більш цілісний погляд на громаду, де прийняття та розширення прав відкривають можливості для справедливого переходу до низьковуглецевої енергетичної системи. Наукові досягнення, підвищення рівня обізнаності громадськості з екологічними проблемами та

економічний клімат прискорили і продовжили інтерес до відновлюваних джерел енергії в усьому світі. Початок роботи з відновлюваними ресурсами вимагає значних змін в нашій енергетичній інфраструктурі. Наявність енергетичних ресурсів вітру, води та сонячного світла, перетворених за допомогою таких пристроїв, як вітрові турбіни, концентровані сонячні електростанції, сонячні фотоелектричні електростанції, фотоелектричні системи на дахах, геотермальні електростанції, гідроелектростанції та приливні турбіни, може забезпечити енергією світ у 2030 році, який використовуватиме електроенергію та електролітичний водень для всіх цілей. Така інфраструктура може призвести до скорочення світового попиту на електроенергію приблизно на 30% від його поточного значення. Незважаючи на те, що існує високий ступінь переваги заміни викопних джерел енергії їх відновлюваними еквівалентами на борту суден, дослідження розвитку відновлюваної інфраструктури для морських перевезень все ще перебуває на перших етапах. На жаль, використання більшості відновлюваних джерел енергії на морі все ще становить велику проблему, але серед різних видів відновлюваних джерел сонячна енергія є пріоритетною для застосування на суднах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якщо ми уважніше подивимося навколо, то побачимо, що будь-яке джерело енергії, навіть викопне паливо, має за основу сонячну енергію. Рослини залежать від Сонця, щоб виробляти їжу, тварини їдять рослини, і вони обидва в кінцевому підсумку стають ключовими інгредієнтами для викопного палива. Без Сонця на нашій планеті не існувало б нічого. Сонце є чудовим джерелом відновлюваної енергії у вигляді тепла і світла, які можуть бути перетворені в електрику. Однак, незважаючи на їх широке використання в основних сферах застосування на суші, присутність сонячних енергетичних систем у сучасних морських технологіях залишається обмеженою. Вони в основному працюють як постачальники енергії для невеликих маяків, буїв і зарядних пристроїв для акумуляторів невеликих вітрильних яхт. Однак зростання транспортних витрат через ціни на паливо, посилення обмежень на викиди вуглекислого газу (CO_2) і оксидів азоту (NO_X) через нову екологічну політику і, нарешті, загальна потреба в більш екологічних видах транспорту - ось причини, які змушують судноплавні компанії переглянути питання систематичного використання фотоелектричних систем на великих суднах. До «зелених» енергетичних технологій також відносять переробку органічних відходів, оскільки в цьому випадку збитки навколишнього середовища мінімізуються. Таким чином, «зелена» енергетика спирається на використання альтернативних у порівнянні з викопним паливом джерел - невичерпних або відновлюваних, - при виробництві енергії з яких завдається набагато меншої шкоди навколишньому середовищу. На користь «зеленої» енергетики свідчать і інші чинники, зокрема можливість здійснювати відносно недорогі локалізовані енергетичні рішення, такі як «сонячні ферми». Крім того, зелені енергоустановки не вимагають значних додаткових витрат енергоресурсів після введення в експлуатацію. Хоча ефективність зеленої енергетики багато в чому визначається географічним розташуванням. Наприклад, у регіонах з інтенсивним сонячним випромінюванням легше та швидше створити ефективне енергетичне підприємство на основі сонячних батарей. Стаття [1] висвітлює виклики у розвитку технологій морської відновлюваної енергетики та пропонує пріоритетні напрямки досліджень для їх вирішення. Автори статті [2] обговорюють ефективність та виклики впровадження сонячних панелей для допоміжного виробництва електроенергії на суднах. Дослідження [3] розглядає можливості використання відновлюваних джерел енергії в морському транспорті, підкреслюючи потенціал скрапленого природного газу (СПГ), як короткострокової альтернативи та відновлюваних джерел енергії як додаткових заходів для морських суден. Стаття [4] фокусується на сьогоденні та майбутньому відновлюваних джерел енергії на борту суден, зокрема, досліджуючи впровадження сонячно-теплових систем. У цих статтях розглядається необхідність переходу до інноваційної та екологічно чистої (сталої) енергетики. Автори статті [5] досліджують, як вчені, що працюють над технологіями відновлюваної енергетики, сприймають свою роль в

енергетичному переході. Дослідження [6] обговорює важливість енергетичної справедливості при переході до низьковуглецевої енергетичної системи. Стаття [7] висвітлює можливі наукові прориви у сфері сталого енергопостачання та споживання. Автори статті [8] наголошують на принципах сталості та цінності атмосфери Землі для досягнення низьковуглецевого енергетичного балансу. Загалом, ці доповіді демонструють постійні дослідження та зусилля, спрямовані на впровадження технологій відновлюваної енергетики в судноплавну індустрію.

Мета дослідження полягає у огляді існуючих сонячних енергетичних установок, які можуть бути використані на борту суден, обговоренні та оцінюванні ефективності використання сонячної енергії як допоміжного джерела живлення з метою зменшення споживання палива та шкідливих викидів. Крім того, у статті розглядаються певні виклики, а також економічні та екологічні питання, пов'язані з можливим застосуванням цієї концепції на борту судна.

Основні результати дослідження. З точки зору доступності, більшість традиційних морських енергетичних установок залежать від викопного палива, яке, як очікується, вичерпається протягом кількох найближчих десятиліть, тоді як сонячна енергія вважається відновлюваним і безперервним джерелом енергії, що постачається Сонцем в усі куточки Землі [9]. Безсумнівно, традиційні морські види палива ефективно працювали протягом останніх десятиліть, особливо з точки зору безпеки, продуктивності та адаптивності. Але через величезну кількість шкідливих викидів з суден Міжнародна морська організація (ІМО) протягом останніх кількох років запровадила суворі правила щодо викидів, щоб подолати цю проблему [10]. З іншого боку, сонячна енергія не спричиняє жодних викидів, тобто є екологічно безпечною. Крім того, на відміну від звичайних морських енергетичних установок, сонячні енергетичні системи працюють безшумно, що є важливим фактором, особливо на пасажирських суднах. Нарешті, сонячні енергетичні системи можуть виступати ідеальним джерелом енергії, незалежним від електромеханічних систем судна [11]. Незважаючи на вищезазначені переваги, низька ефективність сонячної енергетичної системи є основним бар'єром, що обмежує її широке використання. Середній тепловий ККД звичайного суднового двигуна становить близько 40%, тоді як ККД сонячної фотоелектричної системи - від 15 до 20% [12]. Обмеження продуктивності компонентів сонячних фотоелектричних систем, таких як батареї, інвертори та інші системи кондиціонування, є ще одним бар'єром. Крім того, оскільки сонячна електростанція завжди знаходиться під впливом погодних умов, вода може просочуватися крізь крихітні тріщини у склі фотоелектричних модулів, особливо під час сезону дощів, що призводить до накопичення пилу і водоростей уздовж нижньої частини панелей. Все це є основними проблемами в експлуатації фотоелектричних систем. Крім того, низька щільність виробленої енергії ускладнює залежність від сонячної енергії як основного джерела електроенергії на борту суден [13].

Вивчення залежності сонячних енергетичних систем на борту суден вказує на те, що існують деякі фактори, які можуть вплинути на цю застосовність. Ці фактори включають: (1) наявність високої сонячної радіації вздовж маршруту судна, (2) наявність достатньої площі палуби, відкритої для сонця, (3) наявність відповідної фотоелектричної системи, підключеної до мережі, (4) техніко-економічний вибір наявних сонячних панелей і (5) наукова підготовка макета системи.

Дані про розподіл сонячної радіації в конкретному водному регіоні мають життєво важливе значення при оцінці можливості використання будь-якої сонячної енергетичної системи в якості джерела енергії в цьому регіоні. Такі дані є необхідною умовою для проектування будь-якої системи перетворення сонячної енергії. Сонячне випромінювання, що надходить на поверхню Землі, підлягає багаторічному спостереженню (можливо, не менше 20 років), яке необхідно провести, щоб отримати точну оцінку довгострокового розподілу і

доступності. У країнах, що розвиваються, є багато місць, де немає необхідного обладнання для точних і безперервних вимірювань сонячної радіації, тому необхідно використовувати деякі експериментальні методи, засновані на легко вимірюваних метеорологічних параметрах, таких як відносна вологість, температура, тривалість яскравого сонячного сяйва, періоди опадів і хмарність [14]. Середнє багаторічне значення річної суми радіації по всьому світу коливається від 700 до 2700 кВт·год/м^2 , в той час як добова сума становить від 2,0 до 7,5 кВт·год/м^2. Зокрема, з радіаційної карти арабських країн видно, що річна і добова суми радіації коливаються від 1600 до 2400 кВт·год/м^2 і від 4,4 до 6,6 кВт·год/м^2.

Доступна площа палуби на борту судна відіграє важливу роль у кількості поглинутої сонячної енергії. Доступна площа залежить від декількох факторів, таких як тип судна, розміри судна і розташування палубного обладнання. Чим більша кількість сонячних панелей може бути встановлена, тим більше сонячного світла вони можуть зібрати і, відповідно, тим швидше сонячна енергія перетворюється в електрику, яку можна зберігати в акумуляторах. Велика площа палуби також важлива в інших ситуаціях, таких як хмарність або низькокутове та низькоінтенсивне світло взимку. Час зарядки може варіюватися від 4 до 16 годин сонячного світла для однієї батареї, залежно від площі поверхні та умов освітлення. Сонячна енергія може бути розрахована відповідно до географічного положення, площі сонячних панелей та ефективності сонячних панелей.

Мережева фотоелектрична система складається в основному з сонячних панелей, інвертора, акумуляторної батареї та інших необхідних електричних пристроїв. Варто зазначити, що кількість сонячних панелей, які можуть бути використані, залежить від ємності використовуваних акумуляторів. Вироблений постійний струм за допомогою електричних проводів передається до комбінаторної коробки. Електричний струм надходить через роз'єднувач до контролера заряду, який контролює струм, що надходить від сонячних панелей, і запобігає перезарядженню батарей [14]. Потім електроенергія надходить до декількох акумуляторів, що складають акумуляторну батарею. Батареї використовують і зберігають постійний струм. Вони мають низьку вихідну напругу, зазвичай в діапазоні 12-24 вольт. Оскільки більшість приладів на борту суден працюють від мережі 220 В змінного струму, інвертор необхідний в системі для перетворення постійного струму в змінний. Шунт використовується для вимірювання електричного струму, що проходить між акумуляторною батареєю та інвертором. Вироблений змінний струм подається до визначених електроспоживачів, наприклад, для забезпечення освітлення. Коли кількість сонячної енергії стає низькою, спрацьовує автоматичний стартер, який запускає дизель-генератор. Селектор використовується для перемикання між струмом.

Безсумнівно, що додавання додаткової ваги на борт існуючого судна призведе до певних змін у розташуванні його центру ваги, що, ймовірно, вплине на його остійність. Тут слід зазначити, що додаткова вага сонячних панелей, які необхідно розмістити на верхніх палубах, відкритих для сонця, призведе до вертикального зміщення центру ваги судна вгору. Однак при цьому найважчий компонент сонячної енергетичної системи, яким є акумуляторна батарея, зазвичай закріплюється належним чином в нижній частині судна, біля кіля, що призводить до зміщення центру ваги судна вниз. Очікується, що все це призведе до незначного впливу на остійність судна.

Для того, щоб вивчити можливість застосування сонячної енергетичної системи на борту судна, необхідно зібрати і оцінити велику кількість важливої інформації. Приклади таких даних, які необхідно зібрати та/або оцінити, включають: основні характеристики судна, планування палуби, споживання палива, початкові, експлуатаційні та технічні витрати на дизель-генератор, необхідну сонячну енергію для живлення акумуляторних батарей, ринкові ціни на сонячні панелі, серед іншого. Для визначення необхідної кількості сонячних панелей,

здатних забезпечити кількість енергії, аналогічну тій, що виробляється судновим дизель-генератором, слід також взяти до уваги споживану допоміжну потужність судна. На приклад сонячні панелі використовуються для подачі постійного струму 24 В на акумуляторну батарею, від якої живиться електронне обладнання, таке як сигналізація, освітлення, аварійне освітлення, радіонавігаційні прилади, навігаційні вогні та інші аварійні навантаження на борту судна. Зібрані дані використовуються для аналізу вартості впровадженої сонячної енергетичної системи, а потім порівнюються з вартістю спожитого палива від генераторних установок. Також аналізується вплив впровадженої сонячної електростанції на навколишнє середовище.

Економічний аспект є одним з основних показників, які слід брати до уваги як доказ можливої вигоди від встановлення сонячної енергетичної системи на борту судна як допоміжного джерела живлення для деяких електричних приладів, щоб зменшити споживання викопного палива, а отже, заощадити його вартість і уникнути викидів в атмосферу.

Витрати на сонячну батарею та електромережу необхідно оцінювати окремо, оскільки вони не залежать від специфікації системи.

Для вже існуючих суден економічний аспект залежить від доступної площі, відкритої для сонця і придатної для встановлення сонячної батареї, а також від обраної площі сонячної панелі, доступної на ринку.

Вартість системи електромережі включає в себе вартість акумуляторів, інвертора та контролера заряду.

Нарешті, річні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування системи можна оцінити за даними, зібраними від встановлених одиниць, компаній і каталогів, або взяти як відсоток від капітальних витрат і відсоткових платежів.

Кількість викидів від суднового дизель-генератора залежить, головним чином, від коефіцієнтів викидів використаного палива, які значно відрізняються для різних двигунів і видів палива. З іншого боку, викиди від сонячної фотоелектричної системи вважаються рівними нулю, оскільки паливо не спалюється. Щоб оцінити вигоди від використання концепції сонячних фотоелектричних систем як зеленої альтернативи допоміжним дизельним двигунам, дуже важливо оцінити кількість вихлопних газів, що викидаються допоміжними дизельними двигунами. Ці обсяги оцінюються під час плавання та стоянки судна. Кількість викидів залежить, головним чином, від основних коефіцієнтів викидів, споживаного електричного навантаження та часу роботи.

Це дослідження мало на меті з’ясувати, чи підтримують учасники використання певного виду відновлюваної енергії на борту судна. У першому питанні опитування було перераховано п’ять видів відновлюваної енергії: енергія вітру, сонячна енергія, енергія хвиль, спалювання водню та паливні котельні. Для кожного конкретного виду відновлюваної енергії учасникам було запропоновано вказати, наскільки вони згодні з твердженням, що "ця енергія має бути пріоритетною для застосування на борту судна". Учасникам було чітко проінструктовано розглянути свою відповідь за умови, що комерційні судна вирішили використовувати відновлювану енергію для живлення та постачання електроенергії на судна. Серед п’яти видів відновлюваної енергії, запропонованих в анкеті, спалювання водню (80%) було визнано першочерговим пріоритетом для застосування на борту судна, за ним слідують сонячна енергія (72%) та паливні котушки (64%).

Потім дослідження продовжилося, щоб з’ясувати, яку систему на борту судна респонденти вважають першою, що має працювати на відновлюваних джерелах енергії. Респондентів попросили оцінити рівень їхньої згоди з ідеєю переведення певної системи на борту судна на відновлювану енергію. В анкету було включено сім важливих систем. Близько 80% респондентів погодилися або повністю погодилися з тим, що електропостачання під час швартування, виробництво електроенергії під час навігації, охолодження та кондиціонування

повітря, а також дистиляція води є системами, які мають бути переведені на відновлювану енергію, тоді як 71% погодилися або повністю погодилися з тим, що має бути переведена головна рушійна установка. Відносно рідше пропонували перевести на альтернативну енергію допоміжну рушійну установку (носовий рушій) та аварійне електропостачання, які в основному призначені для резервного живлення на борту судна. Загалом, цей висновок вказує на те, що пріоритет повинен бути наданий допоміжним механізмам на борту судна, особливо тим, які потребують електроенергії. Потім у заявці слід розглянути головну рушійну установку. Резервна система повинна розглядатися в останню чергу для застосування відновлюваної енергії.

Це дослідження також вивчало прийнятність практики комбінування різних джерел енергії для живлення торгових суден. Учасникам було запропоновано оцінити свою перевагу щодо конкретної комбінації джерел енергії. В анкеті було запропоновано чотири варіанти енергетичного комплексу: поєднання альтернативних видів енергії з нафтою, поєднання різних альтернативних видів енергії, виключно нафта та виключно ядерна енергія. Визначаючи свій рівень переваг, учасникам було чітко вказано, що вони повинні розглядати питання, виходячи з припущення, що вартість не буде проблемою для вибору, а енергетичний комплекс, якщо він буде обраний, буде розроблений таким чином, щоб найкращим чином відповідати практичним потребам.

Поєднання нафти та відновлюваних джерел енергії було найбільш сприятливим (87%) для учасників серед чотирьох варіантів енергетичного балансу, запропонованих в анкеті. Результат також показав, що 78% учасників висловилися за використання лише відновлюваних джерел енергії для живлення своїх суден, тоді як лише 29% висловилися "трохи за" використання нафти як єдиного джерела енергії на борту, і ще менше (3%) - за використання ядерної енергії. Цей результат відображає загальне очікування того, що відновлювана енергія стане майбутнім джерелом енергії для морської індустрії. Однак експерти галузі виступали за поступову адаптацію, а не за радикальну зміну.

Висновки. Крім побутового використання, сонячна енергія може бути використана для доповнення допоміжної енергії, що зазвичай виробляється дизель-генератором судна. Як наслідок, це дозволить мінімізувати забруднення повітря та витрати на паливо. Фотоелектрична сонячна панель є підходящим сонячним джерелом енергії для суден. Ця стаття показує, що на сьогоднішній день існують певні проблеми, які необхідно вирішити, перш ніж інтегрувати сонячну енергію на судні. Вважається, що основним обмеженням є достатня площа палубного простору, що піддається впливу сонця. Крім того, слід приділити більше уваги підвищенню довговічності фотоелектричної сонячної панелі за рахунок підвищення її ефективності та зниження вартості (можливо, шляхом масового виробництва). В якості чисельного дослідження було обрано дослідницьке судно "Al-Azizi", що належить Університету Короля Абдулазіза і працює в акваторії Червоного моря, щоб продемонструвати переваги сонячної енергетичної системи. Дослідження показало, що в економічному плані при вартості системи 5000 доларів за 10 робочих років запропонована система може досягти економії палива в розмірі близько 18500 і 5600 доларів ($/рік) при міжнародних і місцевих цінах на паливо, відповідно. Крім того, дана робота показує, що використання сонячної енергії для забезпечення загального енергопостачання на судні є розумним початком для проектування екологічно чистого судна. Результати показують, що існує можливість досягти загального скорочення викидів судна приблизно на 21,5 тони на рік. Нарешті, незважаючи на прогнози постійних цін на паливо на низькому рівні, занепокоєння світу щодо суднових викидів прискорить процес використання сонячних енергетичних систем на борту суден в найближчому майбутньому, особливо з новими законодавчими актами, виданими Міжнародною морською організацією.

REFERENCES

1.Ministry of transportstion and communicationS, R.O.C. (n.d.). Ministry Of Transportstion and Communications, R.O.C.-Ministry Of Transportstion And Communications, R.O.C. Retrieved from http://www.motc.gov.tw/en/hypage.cgi?HYPAGE=Eng_AboutMOTC_2_6.asp

2.Zhi, W. (2003). WTO accession, the “Greater China” free-trade area, and economic integration across the Taiwan Strait. China Economic Review, 14(3), 316–349. https://doi.org/10.1016/j.chieco.2003.09.004

3.Lin, C. C., & Chen, Y. C. (2003). The integration of Taiwanese and Chinese air networks for direct air cargo services. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 37(7), 629–647. https://doi.org/10.1016/s0965-8564(03)00010-7

4.Yu K. A perspective on the mutual economic relationship between Mainland China and Taiwan after entering WTO. Study on Taiwan 2001; 8–17, in Chinese.

5.Board of Foreign Trade. Cross-Strait trade statistics monthly, December 2000. Ministry of Economic Affairs, Taiwan, ROC, 2000.

6.Guo, Y., Kim, S., Timothy, D. J., & Wang, K. C. (2006). Tourism and reconciliation between Mainland China and Taiwan. Tourism Management, 27(5), 997–1005. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.08.001

7.Corbett, J. J., Fischbeck, P. S., & Pandis, S. N. (1999). Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships. Journal of Geophysical Research, 104(D3), 3457–3470. https://doi.org/10.1029/1998jd100040

8.Lee S, Gareth LD. The China syndrome: motorization in the largest countries in Asia—implications for oil, carbon dioxide, and transportation. In: Paper presented at the international association for energy economics, 1998.

9.US Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics. Transportation statistics annual report, 1998.

10.Meek-Hansen B. Fuel cell technology for ferries. In: IMTA conference, Gold Coast Australia, 2002.

11.Taiwan Energy Statistics 2005. Energy Bureau, Ministry of Economic Affairs, ROC, 2005.

12.Water Transit Authority. Development of a hybrid Fuel Cell Ferry, Summary Report 2003.

13.Brodrick, C., Lipman, T., Farshchi, M., Lutsey, N. P., Dwyer, H. A., Sperling, D., . . . King, F. G. (2002). Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel trucks. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 7(4), 303–315. https://doi.org/10.1016/s1361-9209(01)00026-8

14. Blue Water 2006, online http://www.foe.org/new/releases.

Honcharuk I.P. Nykyforov Yu.O., Kosharska L.B. Golovan A.I.

FEATURES OF THE INFLUENCE OF RENEWABLE ENERGY ON THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF MARITIME TRANSPORT

The world is facing the challenge of steadily increasing energy consumption. At the same time, energy resources are becoming scarce. Despite the sudden, significant drop in fuel prices worldwide, research activities aimed at reducing dependence on fossil fuels as a traditional energy source still have the upper hand in the shipping industry. The use of clean and renewable energy sources, such as solar power, for example, is being proposed as a method to improve ship efficiency. Ships can benefit from solar energy due to the fact that most of their surface area is always exposed to the sun, especially in sunny regions. This article discusses the effectiveness and challenges of installing solar panels for auxiliary power generation on board a ship. The article emphasizes the need to develop

renewable energy infrastructure for maritime transport. The results of the survey conducted as part of this study serve to inform policy makers on the extent to which policy can or should attempt to provide guidelines and incentives in shaping industry attitudes or behavior towards the use of renewable energy sources. There is a high degree of preference for renewables over fossil fuels for both ship power plants and households. While solar energy is the most favored type of energy for households, hydrogen combustion (80%) is the most supported alternative for commercial shipping power. Fuel cells are the next most popular (64%) alternative energy used on board ships, according to the maritime industry. The result also indicates that the preference for a particular type of energy on board is also based on other factors, such as feasibility, rather than personal preference.

Keywords: *sea vessel, alternative energy, renewable energy, fuel cell.*

УДК 629.5.073.7 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.9

Nosov P.S.

SYSTEMIC APPROACHES TO RATIONAL MANAGEMENT OF FUNCTIONAL MARINE TECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

Наразі набуває особливої актуальності питання розвитку ефективних та безпечних методів управління суднові технічними системами та комплексами (СТСК). У статті, враховуючи безперервний прогрес науки та технологій, пропонується розробка комплексного підходу до раціонального управління функціональними СТСК, який інтегрує наукові стратегії, автоматизацію та інтелектуальні системи.

Основна мета дослідження полягає у формуванні рамкової структури комплексних заходів для управління СТСК в умовах часткової внутрішньої та зовнішньої невизначеності, з особливим акцентом на людський фактор та ергономіку в управлінні. Пропонуєтья глибокий аналіз ризиків, що включає перегляд еволюції методів оцінки ризиків, від інтуїтивних до науково обґрунтованих стратегій, та розглядається впровадження автоматизованих та інтелектуальних систем у процеси управління ризиками СТСК. Робота зосереджується на важливості створення структурної моделі інформаційної підтримки СТСК, включаючи ідентифікацію ключових компонентів зосереджених на ризиках, вивчення внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на СТСК, та розробку механізмів для їх моніторингу та аналізу. Значну увагу приділено розробці схеми для забезпечення раціонального управління СТСК в умовах часткової невизначеності, з акцентом на створенні адаптивних стратегій управління.

Наголошується на важливості розробки інтелектуальної моделі прийняття рішень для СТСК, яка включає детальний аналіз методів інтелектуального аналізу даних, специфічних для суднових технічних систем, імплементацію машинного навчання для динамічного управління судном та розробку критеріїв раціональності управління. Нарешті, стаття підкреслює необхідність удосконалення методу виведення коефіцієнта раціонального управління СТСК, включаючи розробку моделей взаємодії між операторами та технічними засобами для оптимізації інтерфейсів та підготовки операторів.

Отже запропоновано комплексний підхід до управління СТСК, який інтегрує наукові стратегії, автоматизацію, інтелектуальні системи, ергономіку та розглядає важливість врахування людського фактору. Такий підхід має на меті підвищення ефективності,

швидкості, точності та безпеки управління СТСК, особливо враховуючи важливість моніторингу дій операторів суден.

Ключові слова: *раціональне управління; суднові технічні системи; автоматизація та інтелектуальні системи; управління ризиками; ергатичні аспекти; людський фактор.*

Problem Statement. The current state of maritime transportation has encountered challenges in managing MTSC, which include the need for adaptation to changing conditions and potential uncertainty, as well as the necessity of integrating intelligent and automated systems to optimize MTSC management processes. In particular, the efficiency of MTSC technical operations can be significantly enhanced through the integration of ergatic and automated management systems. Automated control modules can play a crucial role in maintaining a high level of readiness of functional installations and the vessel itself, as well as in adapting the crew to changing operational conditions in real-time. The use of intelligent decision-making systems can be a key factor in addressing these challenges, ensuring a high level of reliability, optimizing operational processes, and adapting them to dynamic changes in MTSC operational conditions.

The growth in globalization and the intensification of international freight forwarding contribute to the expansion of maritime routes, underscoring the need for modern, effective, and safe methods of managing vessels and their MTSC. This need is shaped by the continuous development of science and technology. With the rapid evolution of these technologies, new methods emerge to optimize the management and operational processes of MTSC, including automated and intelligent systems. Considering the criticality level in maritime transportation due to accidents caused by human operator errors, there arises a necessity to utilize modern technologies for rational MTSC management models in risk conditions.

Analysis of Recent Research and Publications. Marine and inland waterway transport play a pivotal role in the global movement of goods and passengers. With the rise of globalization, intensification of international trade, and expansion of maritime routes, there emerges a need for modern, efficient, and safe vessel management methods [1]. Such a requirement is shaped not only by geopolitical factors but also by the relentless advancement of science and technology [2].

The contemporary world is marked by the rapid development of information technologies, leading to the emergence of novel methods for optimizing operational processes [3]. Intelligent and automated systems find their applications across various industrial sectors, including maritime transport.

The efficiency of vessel technical operations can be significantly enhanced through the synergistic integration of ergatic and automated systems [4]. Automated control modules can play a crucial role in maintaining a high level of readiness of the power installations and the vessel as a whole, as well as in adapting the crew to changing operational conditions in real-time [5].

Employing intelligent decision-making systems can be a key factor in addressing this challenge, ensuring a high level of reliability, optimizing workflows, and adapting to the dynamic shifts in operational conditions.

Thus, there is an urgent need to develop a framework of comprehensive measures for the rational management of functional maritime technical systems and complexes under conditions of partial internal and external ambiguity.

The aim of the study is to develop a framework structure of comprehensive measures for the rational management of functional Marine Technical Systems and Complexes (MTSC) in conditions of partial internal and external uncertainty, as well as to improve the interaction between the systems and the human factor of MTSC operators.

To achieve the set goal, it is necessary to resolve a series of the following research tasks:

1. Propose principles for analyzing the current state in the field of MTSC management, aiming to consider risks and determine potential management strategies for them.

2. Define the structural model of information support for managing complex technical and MTSC.

3. Formulate a scheme to ensure rational management of functional MTSC in conditions of partial uncertainty.

4. Describe the structure of an intelligent decision-making model for the rational management of functional MTSC.

5. Provide suggestions for refining the method of deriving the coefficient of rational management for functional MTSC.

1. Analysis of the current state in the field of managing complex technical and transport functional of MTSC.

To achieve a higher quality level of risk management in the realm of functional MTSC control, a comprehensive analysis of contemporary approaches is imperative [6]. Firstly, this encompasses the evolution of risk assessment and management methods, which transitions from intuitive methodologies towards scientifically substantiated strategies. An exploration of this progression underscores the significance of implementing research-based strategies in practice, rather than relying on informal techniques.

Subsequently, the focus shifts to the incorporation of automated and intelligent systems into MTSC risk management processes. The integration of such systems can lead to the optimization of functional MTSC management. Specifically, automation holds the potential to enhance accuracy, speed, and efficacy of control. It is crucial to consider how different automation strategies can contribute to the mitigation of operational risks of vessels [7]. The application of intelligent control systems within MTSC also warrants attention. Such systems offer innovative prospects, like real-time risk forecasting and monitoring. However, alongside these benefits, there are inherent risks associated with the dependence on these systems, necessitating strategies for their mitigation.

It's worth noting that the ergatic aspects of MTSC play a pivotal role in risk management. The interfaces of information systems can influence operator errors, and consequently, safety risks. Thus, strategies optimizing human-machine interaction demand development and implementation in MTSC management.

Lastly, the human operator factor remains fundamental and pivotal in MTSC risk management. To comprehend and manage these risks, a focus on the psychophysiological analysis of typical operator errors is essential. Recommendations for monitoring operator actions, both in off-line and on-line modes, can aid in minimizing risks in functional MTSC management.

In conclusion, for optimal risk management in MTSC, a synergy of scientific approaches, automation, intelligent systems, ergatic strategies, and consideration of the human operator factor is necessary (Fig. 1).

We shall analyze formal approaches that will allow for the necessary calculations to implement the proposed ideas and solutions.

a. Analysis of contemporary sources [8]:

Statistical Analysis:

The coefficient of determination R^2, which indicates the proportion of variability in variable y explained by the model:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i \left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{\sum_i \left(y_i - \bar{y}\right)^2}.$$

It will be used to measure the quality of the regression model and will be applied to assess the effectiveness of risk models in MTSC.

The standard error of regression for estimating the accuracy of regression coefficients:

$$SE\left(\beta\right) = \sqrt{\frac{\sum_i \left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{n-2}}.$$

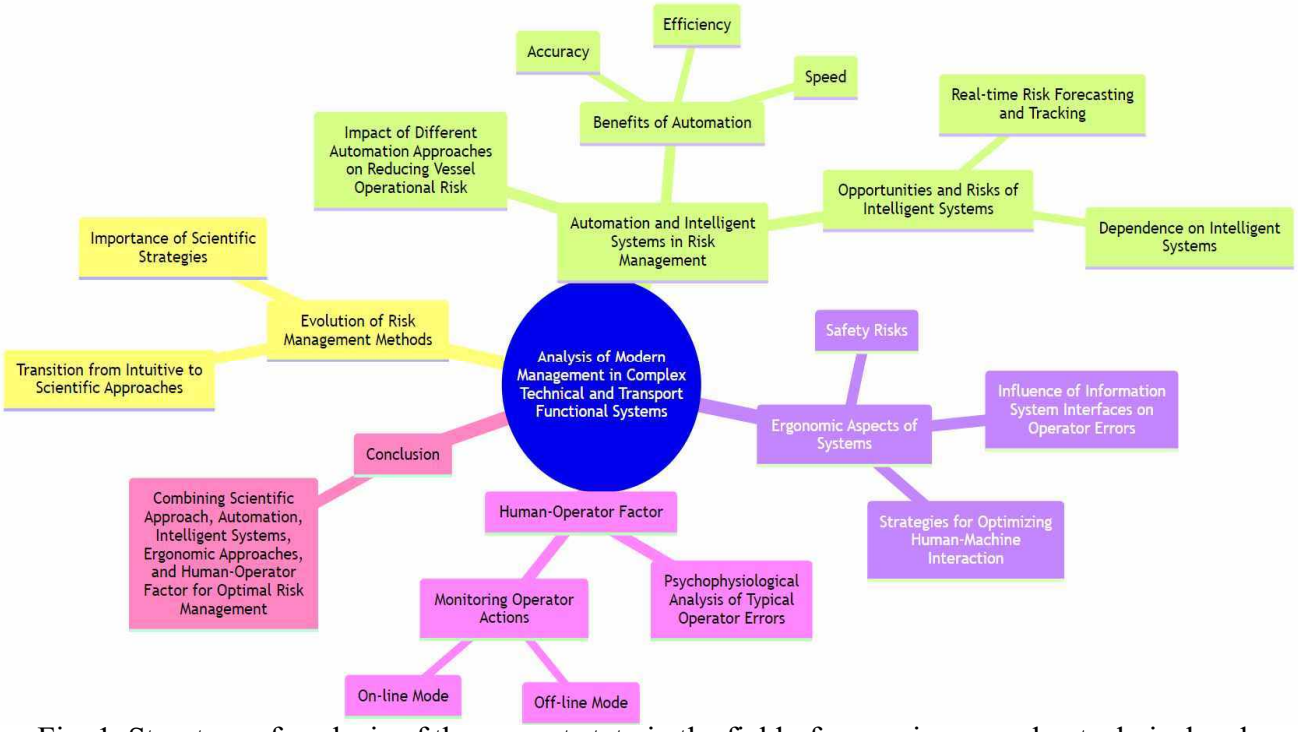


Fig. 1. Structure of analysis of the current state in the field of managing complex technical and transport functional MTSC

This will help determine the reliability of forecasts made by the model, crucial for risk management in MTSC.

Time-Series and Forecasting [9]:

The complex ARIMA (p, d, q) model, including differencing for stationarity:

$$\left(1-\sum_{i=1}^{p}\phi_i L^i\right)(1-L)^d y_t = \left(1+\sum_{i=1}^{q}\theta_i L^i\right)\varepsilon_t,$$

where L is the lag operator, d is the order of differencing.

This model is used for forecasting and understanding time patterns in MTSC risk management, such as trends and cyclical variations in risk factors.

b. Implementation of automated and intelligent systems:

1. Modeling and Simulation [10]:

The dynamic system model in state space:

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)\\ y(t) = Cx(t) + Du(t)\end{cases},$$

where A, B, C, D are system matrices, $\dot{x}(t)$ is the derivative of the state vector $x(t)$ over time, $y(t)$ is the output vector.

In MTSC, this model will be used to simulate various scenarios and assess the impact of different risk factors.

1. Optimization [11]:

Quadratic programming for optimization with a quadratic objective function and linear constraints:

$\min_x \frac{1}{2}x^T Qx + c^T x$, $Ax \le b$, where Q is a symmetric positive definite matrix.

Used for optimizing with a quadratic objective function and linear constraints. In MTSC, this can aid in optimizing resource allocation and operational strategies to minimize risks.

1. Machine Learning:

Support Vector Machine (SVM) for classification [12]:

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} w^T w + C\sum_{i=1}^{n} \xi_i \,,\; y_i \left(w^T \phi\left(x_i\right) + b \right) \geq 1 - \xi_i,\; \xi \geq 0 \,,$$

where w is the weight vector, b is the bias, ξ_i are slack variables, ϕ is the mapping function to a higher-dimensional space, C is the regularization parameter.

SVMs are used for classification and can assist in identifying patterns in data indicative of high-risk scenarios in MTSC.

The indicated models should provide a scientific basis for the analysis and management of risks in MTSC. They will enable the development of more accurate and reliable risk management strategies, which are vital for ensuring the safety and efficiency of these complex systems.

2. Structural model of information support for the management of complex technical and MTSC.

To ensure effective risk management of functional MTSC, it's crucial to focus on creating a comprehensive structural model for information support. This process initiates with the identification of pivotal components of information support centered on risks. Recognizing data sources is an essential step since they serve as a foundation for a detailed risk evaluation and monitoring. Concurrently, determining the most effective tools for risk analysis, prediction, and tracking is imperative, allowing for prompt responses to potential threats [13].

In the subsequent phase, establishing connections between components within the context of risk management becomes paramount. Understanding how different data sources and tools can collaborate is critical for holistic risk management. In this regard, identifying potential vulnerabilities in information flows to devise strategies for their mitigation and ensure continuous monitoring is vital.

Modeling potential MTSC operational scenarios is the ensuing step in this research. Developing predictive models allows for risk analysis under various operational conditions and evaluating potential deviations from the system's standard functioning and their probable impact on MTSC safety and reliability.

In conclusion, integrating ergonomics principles into the structural model plays a significant role. Scientific analysis of the influence of information interface design on operators' decision-making can assist in formulating recommendations for interface optimization [14]. Such an approach aims to enhance risk management efficiency, reduce operator errors, and ensure greater stability and safety of functional MTSC during real-time operations (Fig. 2).

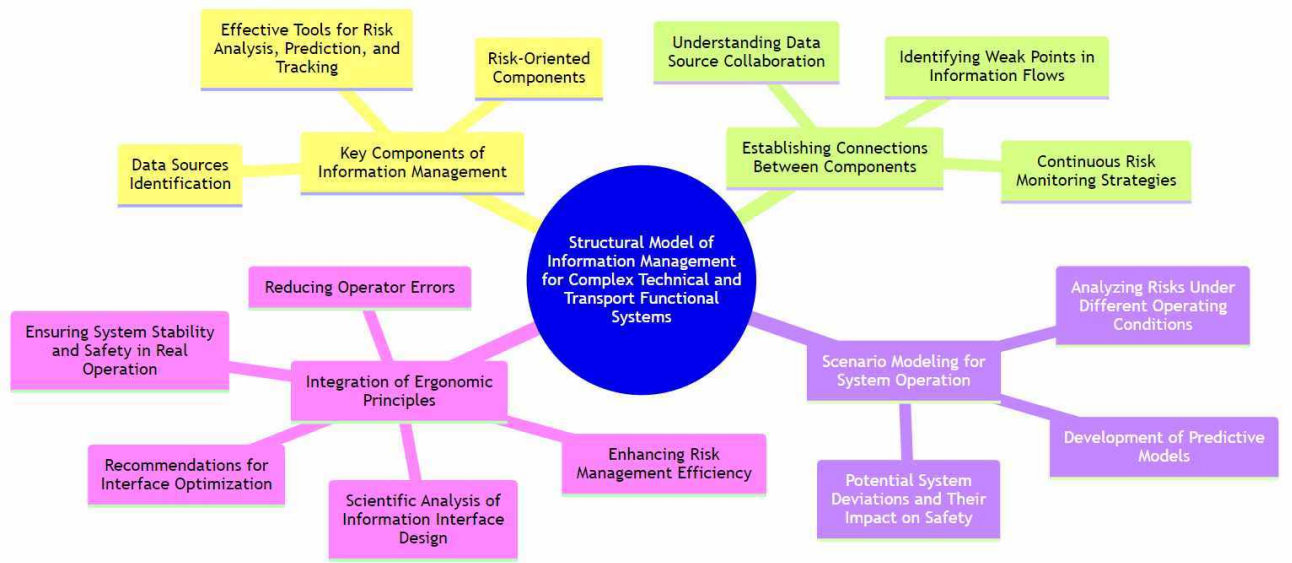


Fig. 2. Structural model of information support for the management of complex technical and marine functional systems and complexes

Let's examine mathematical methods aimed at improving MTSC risk management.

a. Identifying key components of risk-oriented information support:

Data Source Identification [15]:

Utilizing a weighted sum of similarity indices to assess the similarity between data (signals, documents, etc.):

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i J\left(A_i, B_i\right),$$

w_i is the importance weight of each data source, $J(A, B)$ is the Jaccard index of similarity between data A and B.

This method is crucial for identifying relevant data sources for risk assessment in MTSC.

Defining Tools for Analysis [16]:

Advanced Principal Component Analysis (PCA) using spectral decomposition for large data:

$Y = U\Sigma V^T$, where U and V are the left and right singular vectors, and Σ is the diagonal matrix of singular values.

PCA will reduce data dimensions and extract significant features critical for risk analysis and forecasting in MTSC.

b. Establishing connections between components:

Data Source Interaction [17]:

Determining the degree of interaction between components using correlation matrices and network analysis:

$$Corr\left(X_i, X_j\right) = \frac{Cov\left(X_i, X_j\right)}{\sigma_{X_i}\sigma_{X_j}},$$

Where Cov is the covariance, σ is the standard deviation.

This tool will help determine how different data sources are interconnected and affect risk management in MTSC.

2. Vulnerability Detection [18]:

Utilizing community-risk detection algorithms in networks to identify potential vulnerabilities in information flows. Essential for reducing risks and ensuring continuous monitoring in MTSC's lifecycle processes.

c. Modeling Potential Scenarios:

Predictive Models [19]:

Developing stochastic models based on Markov processes for predicting system states:

$P\left(X_{t+1} = x \mid X_t = x_t, ..., X_0 = x_0\right) = P\left(X_{t+1} = x \mid X_t = x_t\right)$.

This will allow for analyzing risks under various operational conditions in MTSC.

2. More Complex Models, such as Integrated Differential Equations for modeling systems with limited resources:

$\frac{dx_i}{dt} = f\left(x_i, r_i, K_i\right) - g\left(x_i\right)$, where $g\left(x_i\right)$ represents the resource expenditure function.

This approach will determine resource constraints and their impact on risk management in MTSC.

d. Integrating Ergatic Principles:

Decision Cost Analysis [20]:

Developing mathematical models for optimizing costs:

$\min_x f\left(x\right) + \lambda R\left(x\right)$ where $R(x)$ is the risk or cost function, λ is the balance parameter between risk and cost.

This will balance risks and costs in decision-making in MTSC.

2. Optimization Recommendations [21]:

Developing factorial experiments to determine optimal interface parameters:

Experiment

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon .$$

Experiment (factors,levels)

Such methods are crucial for enhancing risk management efficiency and reducing operator errors in MTSC.

Overall, these models provide a comprehensive approach to risk management in MTSC. They will enable the analysis of data sources, interactions, and vulnerabilities, assist in predictive modeling and ergonomic optimization, thereby increasing overall safety and stability of operations in MTSC.

3. Method of ensuring rational management of functional MTSC in conditions of partial uncertainty.

To secure rational management of functional MTSC under conditions of partial uncertainty, it's imperative to meticulously study and consider a number of pivotal aspects. Firstly, a profound analysis and identification of factors potentially inducing partial uncertainty is essential. Investigating internal and external factors, such as equipment instability or signal interference, will facilitate the determination of their impact on MTSC management effectiveness and allow for forecasting potential consequences.

While scrutinizing the influence of uncertainty factors, the aim should be towards developing adaptive management strategies. Modeling will enable the dynamic adjustment of management parameters, reflecting the current degree of uncertainty. In this context, it's crucial to focus on devising tactics oriented towards minimizing risks associated with uncertainty.

To assist in the implementation of these adaptive strategies, automated analysis and selection of optimal management parameters become indispensable. Employing intelligent systems for system state prediction will allow operators to swiftly respond to changing conditions and adeptly adapt to novel situations (Fig. 3).

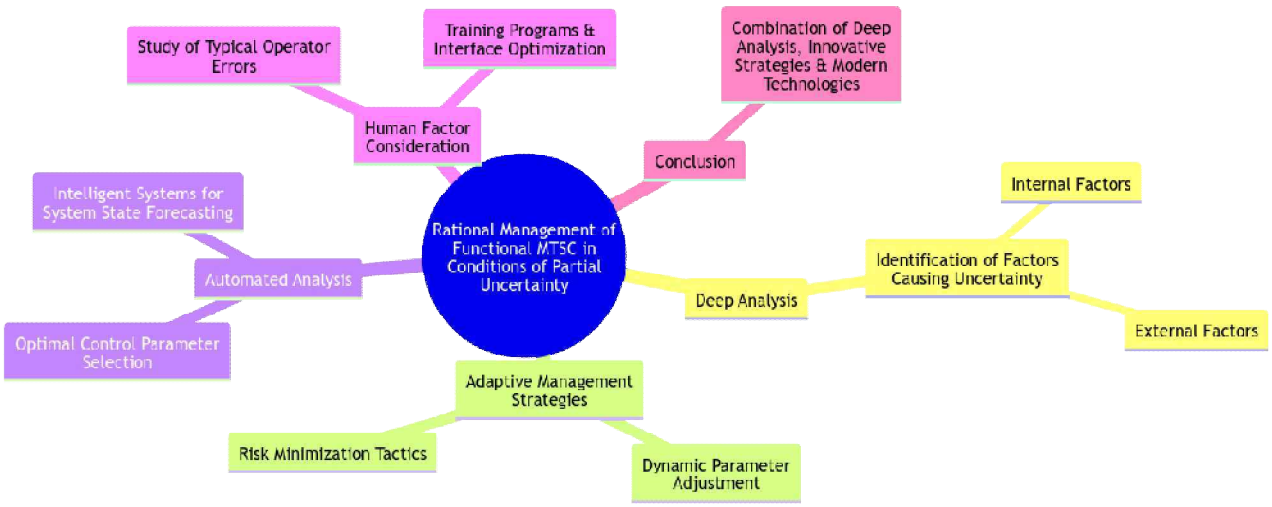


Fig. 3. Method of ensuring rational management of functional MTSC in conditions of partial uncertainty

The last, but by no means least, consideration is the human factor. Even with the finest systems and strategies, management errors may arise due to the human element, especially under heightened uncertainty. Hence, emphasis should be placed on studying typical operator errors and devising training programs and interfaces that utmostly facilitate operators' making judicious decisions under complex conditions.

Rational management of functional MTSC in instances of uncertainty necessitates a combination of profound analysis, innovative strategies, and the integration of contemporary technologies, collectively ensuring the system's reliability, safety, and efficacy.

Let us consider the mathematical apparatus that is crucial for managing MTSC in conditions of partial uncertainty. Here is a brief analysis of the main parts and application methods of the formal research component:

a. Identification and Analysis of Factors Causing Partial Uncertainty:

1. Statistical Method [22]:

Multidimensional regression analysis using interactions between variables:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_{ij} X_i X_j + ... + \varepsilon .$$

This is necessary for a quantitative assessment of the influence of both internal and external factors, such as equipment instability, signal obstructions, operator actions, etc.

The partial correlation coefficient, considering the influence of third variables:

$$r_{x_1 x_2 x_3} = \frac{r_{x_1 x_2} - r_{x_1 x_3} r_{x_2 x_3}}{\sqrt{\left(1 - r_{x_1 x_3}^2\right)\left(1 - r_{x_2 x_3}^2\right)}}.$$

This approach helps understand the unique impact of each variable, isolating its effect from other factors. It is important for identifying the most significant factors contributing to uncertainty manifestations in MTSC.

Forecasting Methods [23]:

Smoothing using the Holt-Winters method for seasonal time series:

$$S_t = \alpha\left(y_t - I_{t-L}\right) + \left(1-\alpha\right)\left(S_{t-1} + b_{t-1}\right),$$

$$b_t = \beta\left(S_t - S_{t-1}\right) + \left(1-\beta\right) b_{t-1},$$

$$I_t = \gamma \frac{y_t}{S_t} + \left(1-\gamma\right) I_{t-L}.$$

The use of multidimensional regression analysis considering variable interactions will allow assessing the impact of various factors on MTSC management.

b. Creation of Adaptive Management Strategies:

1. Control Theory [24]:

Optimal control using Pontryagin's maximum principle:

$$H\left(x,u,\lambda\right) = f\left(x,u\right) + \lambda^T g\left(x,u\right), \ \frac{\partial H}{\partial u} = 0 .$$

This approach aids in forming strategies that dynamically adapt to changing conditions, optimizing a certain efficiency criterion, essential in unpredictable conditions.

Optimization:

Stochastic programming for optimization under uncertainty:

$$\min_{x \in X} \mathrm{E}\left[f\left(x,\omega\right)\right].$$

This method is used for decision-making in implicit scenarios, crucial for managing MTSC in unpredictable conditions.

c. Automated Analysis and Selection of Optimal Management Parameters:

1. Intelligent Systems:

Deep neural networks for big data [25]:

$$y = \phi\left(\sum_{i=1}^{n} W_{ij} \phi\left(\sum_{k=1}^{m} W_{ki} x_k + b_i\right) + b_j\right).$$

These networks will help process large volumes of data and detect patterns, aiding in predicting system states and making rapid decisions.

2. Rapid Response Algorithms:

Reinforcement learning algorithms for optimal real-time management:

$$Q\left(s,a\right) = Q\left(s,a\right) + a\left[r + \gamma \max_{a'} Q\left(s',a'\right) - Q\left(s,a\right)\right].$$

These algorithms help continuously learn and adapt strategies based on real-time data, crucial for dynamic management of MTSC.

d. Creation of Methods to Detect and Minimize the Negative Impacts of the Human Factor:

1. Cognitive Methods:

Cognitive modeling for evaluating decision-making errors:

$$P(error) = \frac{1}{1 + e^{-(a+bX)}}.$$

These methods allow for estimating the probability of decision-making errors, key to identifying and reducing human errors in MTSC management.

2. Ergonomic Methods [26]:

Load modeling based on NASA-TLX criteria for task perception assessment:

$$TLX = \sum_{i=1}^{n} w_i r_i .$$

This method will assess perceived load under stress conditions, helping design operator interfaces and training programs that reduce operator errors in real MTSC management conditions.

Overall, these models and methods will provide a comprehensive approach to managing functional MTSC in conditions of uncertainty. They enable the analysis and mitigation of uncertainty factors, the development of adaptive management strategies, the optimization of management parameters, and the reduction of human operator errors, ensuring the reliability, safety, and efficiency of the system.

4. Intelligent decision-making model for the rational management of functional MTSC.

In the contemporary maritime industry context, particular emphasis is placed on intelligent decision-making systems for managing functional MTSC. To achieve optimal system control, and responses, a series of sequential actions must be undertaken.

The initial step should be a thorough analysis of intelligent data analysis methods that are specific to shipborne systems. Modern approaches to processing data from various sensors and systems are not always directly applicable without adaptation. Hence, there's a need to tailor these methods to the peculiarities of functional MTSC, especially considering the dynamic nature of the data and the imperative for rapid responses.

The subsequent phase focuses on implementing machine learning algorithms for dynamic management. Developing neural networks and other machine learning models capable of learning from operational data will be key to creating adaptive systems. Critical at this juncture is the real-data testing and tuning of algorithms, ensuring an optimal level of adaptability.

Given the specificities of ship operation, the next step involves establishing rational management criteria. It's essential to identify standard and unconventional operational situations that require a certain management approach, as well as to develop metrics that clearly reflect management efficiency under various conditions.

The concluding stage is dedicated to modeling the human-machine interaction system. Studying the primary behavioral patterns of operators when working with shipborne systems will facilitate the development of interfaces that optimize the decision-making process. The objective is to present information to the operator in the most accessible form, promoting swift and well-considered decision-making.

Together, these stages constitute a comprehensive approach to developing an intelligent decision-making model for managing functional MTSC, addressing the contemporary challenges of the maritime industry (Fig. 4).



Fig. 4. Scheme of intelligent decision-making model for the rational management of functional MTSC

Let us examine the formal methods and approaches that are key to managing MTSC using intelligent decision-making systems.

a. Detailed Analysis of Data Mining Methods Specific to Ship Systems:

1. Data Processing Method:

Advanced cluster analysis using the *k*-means method:

$\min \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$, where C_i is the cluster, μ_i is the cluster center, x is the data point.

This will aid in grouping and analyzing data from various sensors and systems, crucial for identifying informational patterns in MTSC.

Adapting to Dynamic Data [27]:

Autoregressive Moving Average Model (ARMA):

$$X_t = \sum_{i=1}^{p} \phi_i X_{t-1} + \sum_{i=1}^{q} \theta_i \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \ .$$

The model will be apt for adapting and forecasting dynamic data, facilitating rapid response in MTSC management.

b. Implementing Machine Learning Algorithms for Dynamic Management:

1. Neural Networks:

Deep learning using Convolutional Neural Networks (CNN):

$f(x) = \max(0, x * W + b)$, where $*$ - is the convolution operation, W - is the weight matrix, b is the bias.

This will assist in developing adaptive systems learning from operational data.

2. Testing and Tuning on Real Data:

Utilizing cross-validation for model assessment. This is crucial for ensuring an optimal level of adaptability of algorithms, using cross-validation.

c. Creating Criteria for Rational Management:

1. Risk Level Assessment [28]:

Bayesian networks for risk assessment:

$P(S \mid E) = \dfrac{P(E \mid S) P(S)}{P(E)}$, where E is the evidence, S is the system state.

Necessary for analyzing standard and atypical operational situations in MTSC.

Efficiency Metrics:

Using entropy to assess uncertainty:

$$H(X) = -\sum_i p(x_i) \log p(x_i).$$

The approach of applying entropy to assess uncertainty will aid in developing metrics reflecting management efficiency under various operational conditions of MTSC.

d. Modeling Human-Machine Interaction System:

1. Operator Behavior Analysis:

Stochastic models for operator behavior considering uncertainty:

$P(O \mid S, I) = \frac{P(S \mid O, I) P(O \mid I)}{P(S \mid I)}$, I is the information available to the operator.

Necessary for using stochastic models to assess operator behavior in uncertain conditions.

2. Interface Optimization [29]:

Adaptive interfaces using recommendation systems:

$U(u,i) = r_{ui} + k \cdot \sum_{s \in S} sim(i,s)(r_{us} - \overline{r}_u)$, where r_{ui} is the rating of operator u for item i, $i, sim(i,s)$ is the similarity between items.

Adaptive interfaces, developed based on recommendation systems, will help optimize the decision-making process in complex operational and management conditions of MTSC.

5. Refinement of the method for deriving the coefficient of rational control for functional MTSC.

To ensure reliable and efficient management of functional MTSC, it is paramount not only to develop and implement new systems but also to refine existing methods. In this context, studying and enhancing the method of deriving the coefficient of rational control becomes a pertinent task.

Firstly, a profound analysis of operational factors that directly influence the management of maritime systems must be conducted. Understanding factors such as weather conditions, the technical condition of the ship, sea state, among others, will facilitate better adaptation to external conditions and appropriate response strategies [30]. Assessing the degree of uncertainty of these factors and their interactions in real-world conditions is vital for devising response strategies.

Subsequently, with the obtained information in hand, it is crucial to perform dynamic modeling of the interaction between external and internal system factors. Developing mathematical models will not only allow for predicting potential risks but will also optimize the management process, ensuring maximum adaptability to various operational scenarios.

Nonetheless, managing maritime systems also has its nuances associated with marine operation. Thus, the next phase will involve adapting management strategies to these specific constraints and optimizing management methods to ensure efficiency in conditions of limited resources.

Lastly, the human-machine interaction aspect cannot be understated. Analyzing the behavior of operators in managing maritime systems will help identify bottlenecks and problematic areas. This, in turn, will enable the development of corrective measures for operators' actions [31], ensuring high efficiency and safety in management, edging us closer to the creation of an optimal control system for functional MTSC (Fig. 5).

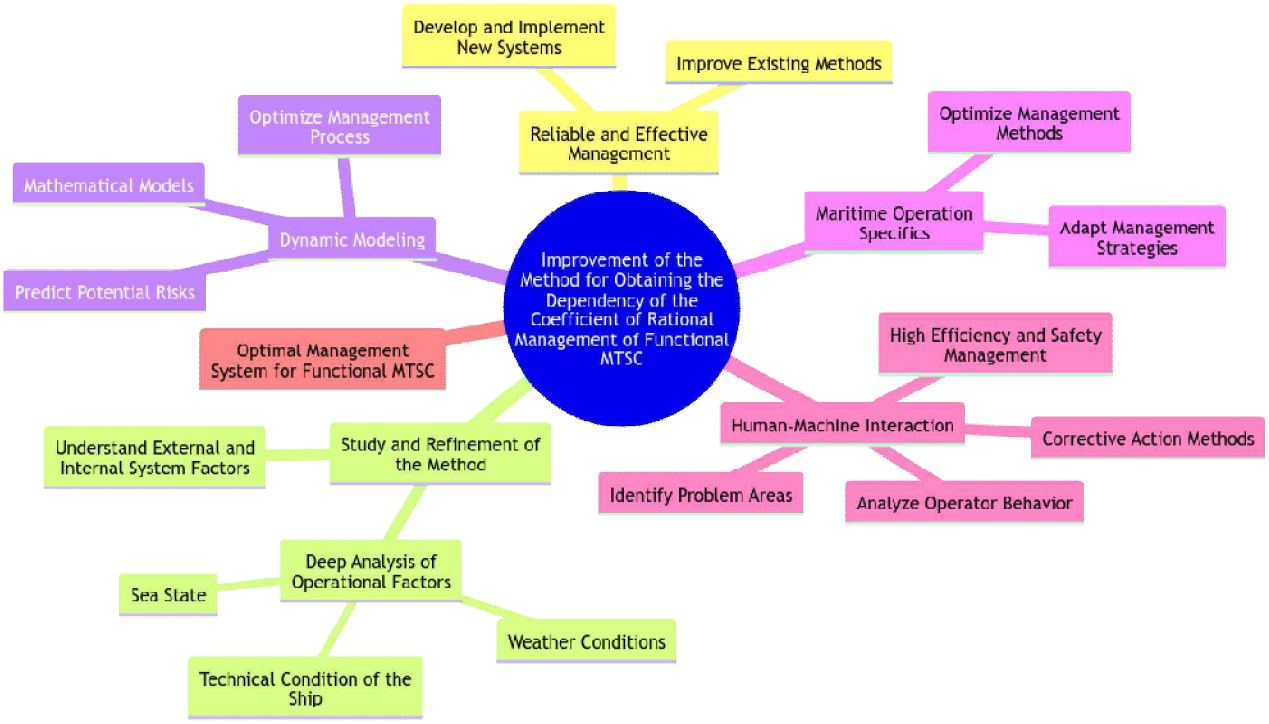


Fig. 5. Refinement of the Method for Deriving the Coefficient of Rational Control for Functional MTSC

In accordance with the outlined structure, it is necessary to identify the appropriate mathematical approaches and formulas aimed at improving the management of MTSC.

a. In-depth Analysis of Operational Factors:

1. Statistical Analysis [32]:

Advanced dispersion analysis for variability assessment:

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2.$$

This method should be used to assess the variability of factors affecting MTSC. It will assist in quantitatively measuring the degree of uncertainty in operational factors.

2. Modified Pearson correlation index for non-standard distributions:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \cdot adjustment\ factor\ .$$

This method is critically important for assessing the correlation between operational factors and MTSC management efficiency, especially when data distribution is non-standard.

Risk Assessment Methods:

Use of integrated risk metrics combining different types of risks:

$R = \sum w_i \cdot R_i$, where R_i is the individual risk, w_i is the weight of importance.

b. Dynamic Modeling of Interaction between External and Internal Factors:

1. Mathematical Modeling:

Extension of the system of differential equations incorporating stochastic elements:

$dX_t = f(X_t, Y_t, Z_t)dt + g(X_t, Y_t, Z_t)dW_t$, where dW_t is the Wiener process for modeling random shocks.

These models are intended for dynamic representation of the interaction of various elements within MTSC, including randomness.

2. Computational Modeling:

Use of agent-based dynamic equation systems for modeling the behavior of individual components:

$\frac{dX_i}{dt} = h\left(X_i, \{X_j\}_{j \neq i}, U\right)$, where U is the control signal from the management system.

This approach models the behavior of individual components within MTSC, considering control signals from the management system to corresponding functional systems.

c. Development of Methods to Account for Constraints Characteristic of Maritime Transport:

1. Optimization [33]:

Application of multi-criteria linear programming to determine the optimal resource allocation:

$\min_x \ Z = c^T x$, $Ax \leq b$, $x \geq 0$, $\min_x \ \sum_i w_i \cdot C_i(x)$, where $C_i(x)$ - is the objective function for the i-th criterion, w_i is the weight of the criterion.

This technique is used to determine the optimal resource allocation under constraints characteristic of maritime operations.

d. Modeling the Human-Machine Interaction System:

1. Operator Behavior Analysis:

Modeling operator decisions using multi-level hierarchical models:

$P_{decision}(O_t \mid S_t, I_t) = \frac{e^{u(O_t, S_t, I_t)}}{\sum_O e^{u(O_t, S_t, I_t)}}$, where u is the utility of making decision O_t in state S_t with information I_t.

The specified mathematical models will help forecast decision-making patterns of operators in various operational scenarios.

2. Interface Optimization:

Optimization of interface ergonomics using covariance analysis:

$\min_x Var(x) + \lambda \cdot Cov(x, u)$, where $Var(x)$ is the variance of interface parameters, $Cov(x, u)$ - is the covariance of interface parameters with user preferences, λ - is the penalty coefficient.

This method is used to optimize the ergonomics of the adaptive operator interface, balancing variations in interface parameters with individual characteristics and the level of risk.

Overall, these mathematical models and methods contribute to refining the process of deriving the coefficient of rational management for MTSC. Through the analysis of operational factors, dynamic modeling of interactions, optimization of resources, and considering the interaction of the human operator and the technical system, these approaches aim to enhance the efficiency and reliability of MTSC management under various risk conditions.

Conclusion. Thus, for rational risk management within the MTSC system, it is crucial to integrate scientific strategies, automation, and intelligent systems. Efficiency, speed, and accuracy are paramount, with a special emphasis on considering the role of the human operator factor, particularly in terms of ergonomics and monitoring their actions. Informational support necessitates the development of a comprehensive model, continuous monitoring of data sources, and effective design of control system interfaces. Given the inherent uncertainties, it is essential to devise adaptive management strategies, employ automation and intelligent systems for rapid response to changes, and consider various factors to minimize risks.

In line with the research objectives, the following tasks have been accomplished:

1. Principles for analyzing the current state in the field of MTSC management have been formulated. A comprehensive risk analysis and potential management strategies for MTSC have been proposed. This includes examining the evolution of risk assessment methods, transitioning from intuitive to scientifically based strategies, and implementing automated and intelligent systems in MTSC risk management processes.

2. A structural model for MTSC informational support has been defined, encompassing the identification of key components focused on risks. The model involves studying internal and external factors affecting MTSC and developing mechanisms for their monitoring and analysis.

3. A scheme for ensuring rational MTSC management has been proposed. The necessity of creating adaptive management strategies has been demonstrated, allowing dynamic adaptation to changing operational conditions, including the development of models for dynamically adjusting MTSC optimal management parameters.

4. A structure for an intelligent decision-making model for MTSC has been developed. The strategy for developing an intelligent decision-making model is described, including a thorough analysis of data mining methods specific to maritime systems and the implementation of machine learning for dynamic MTSC management.

5. Principles for refining the method of deriving the coefficient of rational MTSC management have been outlined. Techniques have been proposed, particularly through modeling the interaction between operators and MTSC functional systems, aiming at optimizing interfaces and operator training.

Overall, the study proposes a comprehensive approach to MTSC management, integrating scientific strategies, automation, and intelligent systems. Efficiency, speed, and precision are key, with a special focus on the role of the human operator factor in MTSC, particularly in aspects of ergonomics and monitoring operator actions.

REFERENCES

1. Allianz Global Corporate & Specialty. (2017). Safety and shipping review 2017: An annual review of trends and developments in shipping losses and safety.

2. Amato, T., Fiorini, M., Gallione, S., & Golino, G. (2011). e-Navigation and future trend in navigation. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 5(1), 11-14.

3. Arroyabe, M. F., Aranzá, N., & Arroyabe, J. C. F. (2015). R&D partnerships: An exploratory approach to the role of structural variables in joint project performance. Technological Forecasting & Social Change, 90, 623-634.

4. Broberg, O. (2007). Integrating ergonomics into engineering design: Empirical evidence and implications for the ergonomists. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 17(4), 353-366.

5. Grech, M. R., & Lützhöft, M. (2016). Challenges and opportunities in user centric ship design: Developing a human centred design approach for navigation systems. Paper presented at the OCEANIC'16 Proceedings of the 28th Australasian Conference on Computer-Human Interaction, Launceston, Tasmania, Australia.

6. Bruno, K., & Lützhöft, M. (2010). Virtually being there: Human aspects of shore-based ship assistance. WMU Journal of Maritime Affairs, 9(1), 81-92.

7. Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., & Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. Accident Analysis and Prevention, 59, 26-37. https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006.

8. Frej, D. (2023). The use of the R2 coefficient of determination to determine the impact of selected parameters on the number of fatalities in road accidents in Poland compared to selected European countries in 2010-2020. Journal of Civil Engineering and Transport, 5, 25-37. https://doi.org/10.24136/tren.2023.006.

9. Romanuke, V. (2022). Arima Model Optimal Selection for Time Series Forecasting. Maritime Technical Journal, 224, 28-40. https://doi.org/10.2478/sjpna-2022-0003.

10. Sánchez, J., & Serrato, R. (2023). Design and Development of an Optimal Control Model in System Dynamics through State-Space Representation. Applied Sciences, 13, 7154. https://doi.org/10.3390/app13127154.

11. Zhang, H., Sun, X., & Li, G. (2023). On second-order conic programming duals for robust convex quadratic optimization problems. Journal of Industrial and Management Optimization, 19, 8114-8128. https://doi.org/10.3934/jimo.2023032.

12. Trishnanti, D., & Al Azies, H. (2019). Comparison of support vector machine method (SVM) and k-nearest neighbor (K-NN) in classification of human development index (HDI). Retrieved from https://osf.io/ncx74/.

13. Hanzu-Pazara, R., Barsan, E., Arsenie, P., Chiotoroiu, L., & Raicu, G. (2008). Reducing maritime accidents caused by human factors using simulators in training process. Journal of Maritime Research, V(1), 3-18.

14. International Organization for Standardization. (2002). ISO/TR 16982: Ergonomics of human-system interaction — Usability methods supporting human-centred design (1st ed.). Retrieved from https://www.iso.org/standard/31176.html.

15. Koeneman, S., & Cavanaugh, J. (2022). An improved asymptotic test for the Jaccard similarity index for binary data. Statistics & Probability Letters, 184, 109375. https://doi.org/10.1016/j.spl.2022.109375.

16. Padilla-Zepeda, E., Torres-Roman, D., & Mendez-Vazquez, A. (2020). Noise analysis using Tucker decomposition and PCA on spectral images. ECORFAN Journal Bolivia. 10-16. https://doi.org/10.35429/EJB.2020.12.7.10.16.

17. Shang, Y. (2023). Matrix-scaled resilient consensus of discrete-time and continuous-time networks. Quarterly of Applied Mathematics, 81, 777-800. https://doi.org/10.1090/qam/1662.

18. Aref, S., & Mostajabdaveh, M. (2023). Analyzing Modularity Maximization in Approximation, Heuristic, and Graph Neural Network Algorithms for Community Detection.

19. Lin, X., Song, L., Rong, D., Zhang, R., & Zhang, W. (2023). Linear Quadratic Optimal Control of Discrete-Time Stochastic Systems Driven by Homogeneous Markov Processes. Processes, 11, 2933. https://doi.org/10.3390/pr11102933.

20. Díez, F., Luque, M., Arias, M., & Pérez Martín, J. (2021). Cost-effectiveness analysis with unordered decisions. Artificial Intelligence in Medicine, 117, 102064. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2021.102064.

21. Goretzko, D. (2023). Regularized Exploratory Factor Analysis as an Alternative to Factor Rotation. European Journal of Psychological Assessment. https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000792.

22. Ejegwa, P., Onyeke, I., Kausar, N., & Kattel, P. (2023). A New Partial Correlation Coefficient Technique Based on Intuitionistic Fuzzy Information and Its Pattern Recognition Application. International Journal of Intelligent Systems, 2023, 14. https://doi.org/10.1155/2023/5540085.

23. Nurhamidah, Wan, N., & Faisol, A. (2020). Forecasting Seasonal Time Series Data using The Holt-Winters Exponential Smoothing Method of Additive Models. Jurnal Matematika Integratif, 16, 151-157. https://doi.org/10.24198/jmi.v16.n2.29293.151-157.

24. Bùi, L., & Trần, T. (2016). Multi-objective optimal control for eigen-frequencies of a longitudinal bar using Pontryagin's maximum principle. Vietnam Journal of Mechanics, 38. https://doi.org/10.15625/0866-7136/6058.

25. Zgurovsky, M., & Zaychenko, Y. (2020). Deep Neural Networks and Hybrid GMDH-Neuro-fuzzy Networks in Big Data Analysis. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14298-8_2.

26. Bell, S., Kong, J., Clark, D., Carne, P., Skinner, S., Pillinger, S., Burton, P., & Brown, W. (2022). The National Aeronautics and Space Administration-task load index: NASA-TLX: evaluation of its use in surgery. ANZ journal of surgery, 92. https://doi.org/10.1111/ans.17830.

27. Oseni, I., Olasunkanmi, Salihu, M., & Olalekan. (2017). INFLATION RATE FORECASTING: AN APPLICATION OF AUTOREGRESSIVE MOVING AVERAGE MODEL (ARMA).

28. Moe, J., Carriger, J., & Glendell, M. (2020). Increased Use of Bayesian Network Models Has Improved Environmental Risk Assessments. Integrated Environmental Assessment and Management, 1-9. https://doi.org/10.1002/ieam.4369.

29. Tufano, F., Bahadure, S., Tufo, M., Novella, L., Fiengo, G., & Santini, S. (2023). An Optimization Framework for Information Management in Adaptive Automotive Human–Machine Interfaces. Applied Sciences, 13, 10687. https://doi.org/10.3390/app131910687.

30. Weintrit, A. (2011). Development of the IMO e-Navigation concept - Common maritime data structure. In M. J. (Ed.), Modern Transport Telematics. TST2011. Communications in Computer and Information Science (Vol. 239). Berlin, Heidelberg: Springer.

31. Vicente, K. J. (2008). Human factors engineering that makes a difference: leveraging a science of societal change. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 9(1), 1-24. https://doi.org/10.1080/146392206007234.

32. Ali, N., Nyakoe, G., & Saulo, M. (2022). A Hybrid Islanding Detection Method Based on Pearson Correlation Coefficient. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 11, 333-343. https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.5.333-343.

33. Wang, X., Xie, X., Zeng, G., Zhang, L., Li, K., & Chen, G. (2022). Risk Assessment Method for Ship Based on Improved Fuzzy Multicriteria Decision-Making. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 1-16. https://doi.org/10.1155/2022/9743396.

Nosov P.S.

SYSTEMIC APPROACHES TO RATIONAL MANAGEMENT OF FUNCTIONAL MARINE TECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

In the present era, the development of effective and safe management methods for marine technical systems and complexes (MTSC) is gaining particular importance. The article, considering the continuous progress of science and technology, proposes the development of a comprehensive approach to the rational management of functional MTSC, integrating scientific strategies, automation, and intelligent systems.

The main goal of the research is to create a framework structure of comprehensive measures for managing MTSC in conditions of partial internal and external uncertainty, with a special emphasis on the human factor and ergonomics in management. A deep risk analysis is proposed, including a review of the evolution of risk assessment methods, from intuitive to scientifically substantiated strategies, and the implementation of automated and intelligent systems in the processes of managing MTSC risks.

The work focuses on the importance of creating a structural model of information support for MTSC, including the identification of key components focused on risks, studying internal and external factors affecting MTSC, and developing mechanisms for their monitoring and analysis. Significant attention is paid to the development of a scheme for ensuring rational management of MTSC in conditions of partial uncertainty, with an emphasis on creating adaptive management strategies.

The importance of developing an intelligent decision-making model for MTSC is emphasized, which includes a detailed analysis of methods for intelligent data analysis specific to ship technical systems, the implementation of machine learning for dynamic ship management, and the development of criteria for management rationality.

Finally, the article highlights the need to refine the method for deriving the coefficient of rational management of MTSC, including the development of models of interaction between operators and technical means to optimize interfaces and train operators.

Thus, a comprehensive approach to managing MTSC is proposed, integrating scientific strategies, automation, intelligent systems, ergonomics, and considering the importance of the human factor. This approach aims to increase the efficiency, speed, accuracy, and safety of managing MTSC, especially considering the importance of monitoring the actions of ship operators.

Keywords: *rational management; ship technical systems; automation and intelligent systems; risk management; ergatic aspects; human factor.*

УДК 681.5.04 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.10

Богом`я В.І.

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО СОНАРУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ БЕЗПІЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Метою роботи є дослідження і розробка методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки безпілотних підводних апаратів і підвищення ефективності та безпеки досліджень підводних комунікацій. Аналіз предметної області показав, що зі збільшенням кількості підводних комунікацій і їх довжини зростає необхідність періодичного огляду для виявлення пошкоджень і сторонніх предметів, які можуть привести до аварій. На сьогоднішній день для обстеження використовуються різні засоби, такі як надводні судна, водолази і дистанційно керовані підводні апарати. Однак ці методи мають свої обмеження, що призводить до дорожнечі і складності робіт. Безпілотні підводні апарати є перспективним рішенням проблеми обстеження підводних комунікацій. Вони відрізняються тривалою автономністю, великою маневреністю і відносно низькою вартістю. Крім того, вони можуть оснащуватися різними датчиками для збору даних про стан комунікацій. У статті були наведені результати розробки методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки безпілотних підводних апаратів й ефективного обстеження підводних комунікацій. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятьма і більше пучками можуть успішно ідентифікувати протяжні об'єкти з різним перетином. Імовірність виявлення навіть частково прихованих об'єктів огляду становить понад 0,85, що достатньо для управління безпілотними підводними апаратами. Таким чином, розроблений метод виявлення за допомогою багатопроменевого сонару може бути ефективно застосований в безпілотних системах управління підводними апаратами для обстеження підводних комунікацій з високою точністю і надійністю. Це дає можливість підвищити безпеку і ефективність обстеження і підтримувати підводні комунікації в належному стані.

Ключові слова*: багатопроменевий сонар, безпілотні підводні апарати, обстеження підводних комунікацій, розпізнавання підводних об'єктів, безпека, моделювання, безекіпажне судно*, пошук на морі, роботизований комплекс .

Постановка проблеми. У міру збільшення кількості підводних комунікацій і їх протяжності все більш актуальним стає завдання періодичного огляду цих комунікацій. Обстеження необхідно проводити для виявлення пошкоджень або наявності сторонніх предметів, які можуть привести до виходу з ладу або пошкодження комунікацій. Зазвичай для обстеження підводних комунікацій використовуються надводні судна, водолази, буксирувані і дистанційно керовані підводні апарати. Однак ці методи мають ряд обмежень, таких як висока вартість, складність та обмежена автономність. Безпілотний підводний апарат (БПА) є перспективним рішенням проблеми вивчення підводних комунікацій. БПА може тривалий час перебувати під водою, має велику дальність дії, маневрений і відносно недорогий. Крім того, БПА може оснащуватися різними датчиками, які дозволяють йому збирати дані про стан підводних комунікацій. Однак існує ряд проблем, які необхідно вирішити для ефективного використання БПА для обстеження підводних комунікацій. Однією з проблем є підвищення точності і надійності виявлення (розпізнавання) підводних комунікацій. Ефективним і точним методом виявлення підводних об'єктів є багатопроменеві сонари. Однак вони мають ряд

проблем, які необхідно вирішити для ефективного використання з БПА. Однією з проблем є те, що багатопроменевий сонар, як правило, є чутливим до шуму, що може знизити його точність. Ще одна проблема полягає в тому, що багатопроменевий сонар – дорогий пристрій, що може обмежити його використання в деяких випадках. Незважаючи на ці проблеми, багатопроменевий сонар є важливим інструментом безпеки БПА. Пристрій дозволяє виявляти підводні об'єкти, що допомагає БПА уникнути зіткнення з ними і тим самим уникнути пошкоджень. Багатопроменевий сонар також використовується для картографування підводного простору, що дозволяє БПА безпечно пересуватися. Таким чином, вивчення підходів до підвищення ефективності використання багатопроменевого гідролокатора для забезпечення безпеки БПА є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує значна кількість досліджень щодо покращенням ефективності управління безпілотними підводними апаратами [1 - 10].

Наприклад, в статті [1] наведено короткий огляд різних стратегій спільного пошуку й управління формуванням для декількох автономних підводних апаратів (autonomous underwater vehicles (AUV)), заснованих на опублікованих літературних даних. Обговорюються різні схеми спільного та групового управління для збору величезних обсягів даних, заснованих на управлінні регулюванням резервуарів та управлінні простежуваністю резервуарів. Для вирішення проблеми виявлення відмови AUV на флоті також враховуються питання зв'язку, уникнення зіткнень та уникнення перешкод. Також представлений аналіз стійкості можливого резервуара.

У статті [2] описана конструкція автономного/дистанційного підводного апарату Intelligence Ocean I (IO-I), здатного працювати в режимі АНПА й отримувати інформацію про морське середовище і власні дані про стан. Наведені рівняння динаміки підводних апаратів по горизонталі і вертикалі, що описують рух підводного апарату з урахуванням сили тяжіння, плавучості, тяги і гідродинамічної сили. Крім того, для реалізації високоточного автоматичного управління роботом нечіткий алгоритм управління, пов'язаний з інтелектуальним управлінням, поєднується з каскадним алгоритмом ПІД-регулятора для реалізації модифікованого алгоритму управління підводним апаратом, що покращує застосовність алгоритму управління і знижує складність і трудомісткість налаштування параметрів.

У роботі [3] представлений вдосконалений контролер часової затримки (time-delay controller (TDC)) для контролю положення автономного підводного апарату в умовах збурення. Звичайний TDC добре працює, коли мова йде про високі показники збору даних. Однак програми управління AUV, які використовують навігаційну систему доплерівського журналу швидкостей (Doppler velocity log (DVL)), не можуть підтримувати достатньо високу швидкість збору даних, оскільки датчик DVL зазвичай надає дані з низькою швидкістю збору, що знижує продуктивність TDC. Щоб подолати цю проблему, автори пропонують вбудовану ковзну ручку на додаток до звичайного TDC для підвищення точності управління навіть при працюючій навігаційній системі DVL. Запропонований контролер є обчислювально простим і стійким до незмодельованої динаміки і збурень.

Метою роботи є дослідження та розробка методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки БПА та підвищення ефективності та безпеки проведення зйомок підводних комунікацій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Безпілотні підводні апарати оснащені ехолокаційними далекомірами для організації руху і збору інформації поблизу землі. Однак поточні дані акустичних далекомірів несуть неповну інформацію про форму навколишніх предметів. Це пояснюється тим, що акустичні далекоміри вимірюють лише відстань до об'єкта, але не його форму. Для отримання тривимірної картини навколишніх об'єктів необхідно об'єднати дані акустичних далекомірів з координатами носія в моменти вимірювання відстаней.

Об'єднання даних акустичних далекомірів з координатами носія дозволяє отримати тривимірну картину навколишніх об'єктів. Ця інформація може бути використана для

організації руху БПА, збору інформації про підводний світ та загалом забезпечення безпеки БПА.

Запропонований метод розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки БПА складається з двох етапів (рис. 1):

1. Перший етап, коли БПА використовує ехолокаційні та навігаційні системи для побудови моделі зовнішнього середовища. У цьому випадку завдання розпізнавання досліджуваного об'єкта зводиться до завдання тривимірного розпізнавання акустично видимої частини об'єкта на тлі дна.

2. Другий етап, коли форма підводного об'єкта штучного походження (ПОШП) порівнюється з формою обстежуваної частини дна за допомогою алгоритму, заснованого на нечіткій логіці. Алгоритм визначає міру впевненості в знаходженні об'єкта в обстежуваної частини поверхні дна, а також взаємне розташування БПА та об'єкта обстеження.

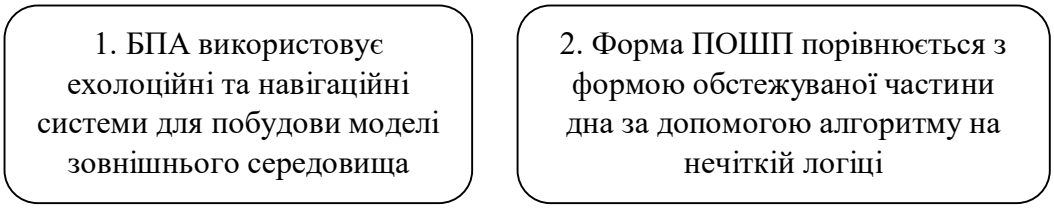


Рисунок 1 – Узагальнена структура методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки БПА

Модель рельєфу дна описує поверхню за допомогою параметричної функції. Ця функція дозволяє зберігати інформацію про складну місцевість та інші об'єкти, які неможливо описати за допомогою карти висот (наприклад, трубопровід). Координати точок місця розраховуються на підставі даних навігаційної системи, відомого положення антен системи ехолокації на борту БПА та їх показань. Припустимо, що об'єкт дослідження однозначно визначається формою його поперечного розділу. Це означає, що можна визначити нечіткі значення «поверхні» та «неповерхні» для всіх відгуків в області ПОШП. Для виявлення об'єкта досить знайти точку, розташовану на його поверхні і яка лежить над поздовжньою віссю ПОШП. Алгоритм розпізнавання полягає в тому, що для кожного нового відгуку вважається гіпотеза про його приналежність до вершини шуканого об'єкта. Алгоритм визначає міру впевненості в тому, що відгук належить вершині об'єкта і порівнює її з пороговим значенням. Якщо довірча міра вище порога, то відгук вважається приналежністю до вершини об'єкта.

Міра впевненості в наявності ПОШП в даній точці розраховується на основі таких нечітких продукційних правил:

1. «ЯКЩО кількість точок навколишнього середовища, що належать поверхні об'єкта, більше порогового значення, ТО оцінка існування об'єкта в точці висока».

2. «ЯКЩО кількість точок навколишнього середовища, розташованих в місцях, де вони не можуть бути розташовані, більше порогового значення, ТО оцінка існування об'єкта в точці низька».

Перше правило говорить, що чим більше точок навколишнього середовища належить поверхні об'єкта, тим вище ймовірність того, що об'єкт існує в цій точці. Порогове значення визначає, скільки точок навколишнього середовища потрібно для того, щоб об'єкт вважався існуючим. Нечіткі продукційні правила використовуються для обліку невизначеності даних. Наприклад, якщо кількість точок навколишнього середовища дорівнює пороговому значенню, то не можна з повною впевненістю сказати, існує об'єкт чи ні.

Друге правило говорить, що чим більше точок навколишнього середовища розташовано в місцях, де вони перебувати не можуть, тим нижче ймовірність того, що об'єкт існує в цій точці. Порогове значення визначає, скільки точок навколишнього середовища потрібно для того, щоб об'єкт вважався неіснуючим. Наприклад, якщо навколишні точки розташовані всередині, безпосередньо під об'єктом або занадто далеко від нього, то вони не можуть належати поверхні

об'єкта. Таким чином, їх кількість буде включена до числа точок, розташованих в місцях, де вони перебувати не можуть. Це призведе до зменшення оцінки існування ПОШП у точці.

Формально значення показника наявності ПОШП у певній точці рельєфу дна $[X_0; Y_0; Z_0]^T$ визначаються за таким виразом

$$\vartheta_0 = \sum_{t=t_0}^{t_0-\Delta t} \sum_{s=1}^{S} \Big(V_1 \mu_1\big(\Delta x(t,s), \Delta z(t,s)\big) - V_2 \mu_2\big(\Delta x(t,s), \Delta z(t,s)\big)\Big), \qquad (1)$$

де $\Delta x(t,s), \Delta z(t,s)$ – координати проекцій точок нижньої поверхні на площину з координатами центру в точці $[X_0; Y_0; Z_0]^T$ і нормаллю, яка спрямована уздовж об'єкта виявлення (Δx – вісь праворуч, Δz - верх);

Δt – інтервал часу, з якого вибираються точки навколишнього середовища;

S – кількість акустичних далекомірів;

V_1, V_2 – ваги функцій приналежності.

Запропонований метод розпізнавання ПОШП має особливість, що дозволяє формувати функції приналежності для об'єктів довільної форми. Це означає, що метод здатний виявити такі протяжні об'єкти, як трубопроводи (в тому числі з некруглим перетином), траншеї і т. д. Опис шуканого об'єкта може бути задано як аналітично (для об'єктів простої форми), так і з табличною формою і у вигляді графіків функцій приналежності.



Рисунок 2 – Виявлення протяжного підводного об'єкта штучного походження

На рис. 2 наведено варіант проведення модельних експериментів з розпізнавання трубопроводів. Ширина смуги по траєкторії БПА відображає площу поверхні дна, покритої віялом гідроакустичних променів. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятьма і більше пучками можуть ідентифікувати протяжний об'єкт (з поперечним перерізом від 0,5 до 2 метрів) незалежно від взаємної орієнтації БПЛА і ПОШП. Імовірність виявлення навіть частково прихованого об'єкта огляду вище 0,85 (чого достатньо для контролю БПА).

Модельні експерименти проводилися з використанням розробленого програмного симулятора багатопроменевого сонару. Програмний симулятор багатопроменевого сонару реалізований як набір функцій Python (використовувалися такі основні бібліотеки: NumPy (бібліотека для роботи з масивами), SciPy (бібліотека для наукових обчислень), Matplotlib (бібліотека для візуалізації даних), Pandas (бібліотека для роботи з багатовимірними даними).

Функції симулятора можна використовувати для моделювання різних типи багатопроменевих гідролокаторів, для моделювання різних типів підводних об'єктів і для моделювання різних умов навколишнього середовища.

Розроблений тренажер має у своєму складі кілька програмних модулів і працює таким чином (рис. 3). Модуль моделювання навколишнього середовища створює модель підводного простору, в якому розташований сонар. Екологічна модель містить такі об'єкти, як морське дно, підводні об'єкти, джерела шуму. Модуль моделювання сонару реалізує гідроакустичну модель. Гідроакустична модель має такі параметри, як частота, потужність і кут випромінювання сонара. Модуль обробки сигналів приймає сигнали, відбиті від підводних об'єктів, й обробляє їх. Модуль обробки сигналу розраховує розташування, форму і розміри підводних об'єктів. Модуль розпізнавання підводних об'єктів реалізує алгоритм на основі нечіткої логіки для визначення міри впевненості в знаходженні об'єкта в обстежуваної частини поверхні дна. Модуль відображення відображає результати обробки сигналу на екрані комп'ютера. Такі дані, як ехограма, розташування розпізнаних підводних об'єктів і їх характеристики, можуть бути показані на екрані комп'ютера.

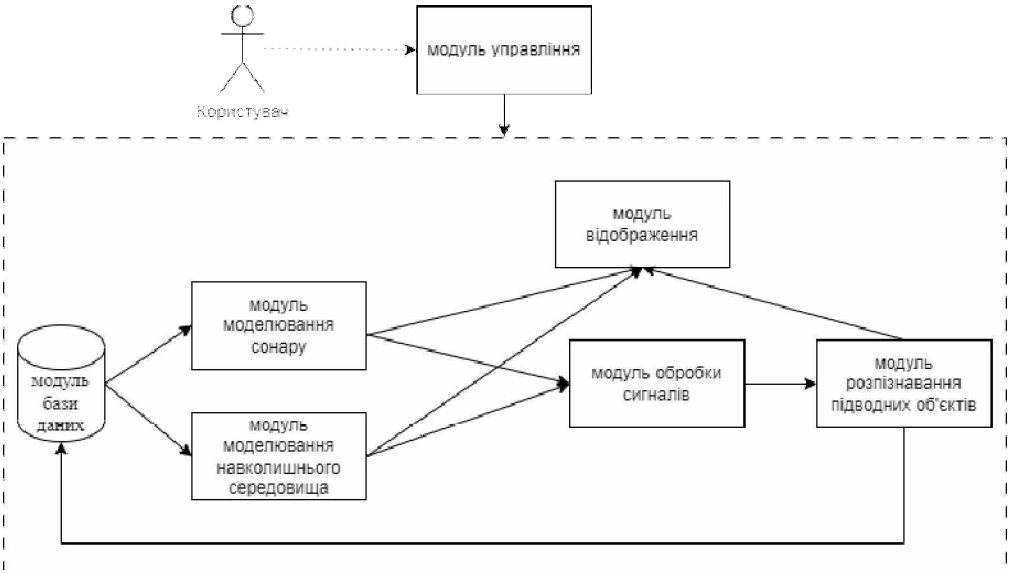


Рисунок 3 – Узагальнена архітектура програмного симулятора багатопроменевого сонару

Обмеження і припущення, що накладаються на процес модельного експерименту з використанням розробленого програмного симулятора багатопроменевого гідролокатора:

1) симулятор імітує тільки статичне середовище. Динамічні об'єкти, такі як рухомі кораблі, не моделюються;

2) симулятор імітує тільки одиночний сонар. Спільна робота декількох гідролокаторів не імітується;

3) тренажер імітує тільки ідеальні умови. Шум, відлуння з дна моря та інші фактори, які можуть вплинути на якість ехограми, не моделюються.

Висновки. Підводні комунікації грають важливу роль. Однак вони схильні до різних небезпек та аварій. Щоб забезпечити безпеку підводних комунікацій, необхідно регулярно їх оглядати. Безпілотні підводні апарати є перспективним рішенням проблеми обстеження підводних комунікацій. БПА відрізняються тривалою автономністю, великою маневреністю і відносно низькою вартістю. Крім того, вони можуть оснащуватися різними датчиками для збору даних про стан комунікацій. У даній роботі проведено дослідження та розробку методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки БПА та ефективного обстеження підводних комунікацій. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятьма і більше пучками можуть успішно ідентифікувати протяжні об'єкти з різним перетином.

Таким чином, розроблений метод виявлення з використанням багатопроменевого сонару може бути ефективно застосований в системах управління БПА для обстеження підводних комунікацій з високою точністю і надійністю. Це дає можливість підвищити безпеку і ефективність обстеження і підтримувати підводні комунікації в належному стані.

REFERENCES

1. Das, B., Subudhi, B. & Pati, B.B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview. Int. J. Autom. Comput. 13, 199–225 (2016).

2. F. Kong, Y. Guo and W. Lyu, "Dynamics Modeling and Motion Control of an New Unmanned Underwater Vehicle," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 30119-30126, 2020.

3. J. Kim, H. Joe, S. -c. Yu, J. S. Lee and M. Kim, "Time-Delay Controller Design for Position Control of Autonomous Underwater Vehicle Under Disturbances," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1052-1061.

4. Xiang-Rui Huang, Liang-Bi Chen, "An underwater explorer remotely operated vehicle: Unraveling the secrets of the ocean", IEEE Potentials, vol.42, no.3, pp.31-36, 2023..

5. Chinonso E. Okereke, Mohd Murtadha Mohamad, Nur Haliza Abdul Wahab, Olakunle Elijah, Abdulaziz Al-Nahari, S. Zaleha.H, "An Overview of Machine Learning Techniques in Local Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles", IEEE Access, vol.11, pp.24894-24907, 2023.

6. Anggun Winursito, Oktaf A. Dhewa, Aris Nasuha, Gilang N. P. Pratama, "Integral State Feedback Controller with Coefficient Diagram Method for USV Heading Control", 2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), pp.295-300, 2022.

7. Rasheed Abdulkader, "Non-integer Controller for Autonomous Underwater Vehicle Steering Control", 2021 IEEE International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON), pp.102-105, 2021.

8. Meng Zhang, Jin Chen, Liang Wang, "Research on Deep Control Simulation of Small UUV Based on Pan-Boolean PID", 2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT), pp.119-122, 2021.

9. Guanjun Yang, Weiran Wang, Jinghao Yan, Pengfei Zhi, Huilin Ge, Zhiyu Zhu, "Improved Multi-Motor Synchronization Control of Underwater Robot Based on Virtual Shaft", 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp.4652-4657, 2021.

10. Sudarshan K. Valluru, Karan Sehgal, Hitesh Thareja, "Evaluation of Moth-Flame Optimization, Genetic and Simulated Annealing tuned PID controller for Steering Control of Autonomous Underwater Vehicle", 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), pp.1-6, 2021.

Bohomia V.I.

A METHOD FOR RECOGNIZING UNDERWATER OBJECTS USING MULTIBEAM SONAR TO ENSURE THE SAFETY OF AN UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

The aim of the work is to research and develop a method for recognizing underwater objects using multibeam sonar to ensure the safety of unmanned underwater vehicles and improve the efficiency and safety of underwater communications research. The analysis of the subject area showed that with the increase in the number of underwater communications and their length, the need for periodic inspection to identify damage and foreign objects that can lead to accidents increases. Today, various means are used for survey, such as surface vessels, divers and remotely controlled underwater vehicles. However, these methods have their limitations, which leads to high cost and complexity of work. Unmanned underwater vehicles are a promising solution to the problem of surveying underwater communications. They are characterized by long-term autonomy, high maneuverability and relatively low cost. In addition, they can be equipped with various sensors to collect data on the

state of communications. In this work, research and development of a method for recognizing underwater objects using multibeam sonar were carried out to ensure the safety of unmanned underwater vehicles and effective shooting of underwater communications. Simulations have shown that echolocation systems with ten or more beams can successfully identify extended objects with different cross-sections. The probability of detecting even partially hidden objects of vision is more than 85%, which is enough to control unmanned underwater vehicles. Thus, the developed multibeam sonar detection method can be effectively applied in unmanned underwater vehicle control systems to survey underwater communications with high accuracy and reliability. This makes it possible to increase the safety and efficiency of the survey and maintain underwater communications in proper condition.

***Keywords**: multibeam sonar, unmanned underwater vehicles, survey of underwater communications, recognition of underwater objects, safety, modeling.*

УДК 681.5.04 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.11

Дубинець О.І.

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ АНОМАЛІЙ У ВИТРАТІ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКОГО СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОЕНКОДЕРА ІЗ ПОДАВЛЕННЯМ ШУМУ

Метою статті є автоматизація процесу виявлення аномалій, пов'язаних із деградацією дизелів морських суден на основі автоенкодера із подавленням шуму. Методи виявлення аномалій спрямовані на виявлення відхилень від типового функціонування. З точки зору системи прогнозування та управління станом (Prognostics and health management (PHM)), яка оперує даними, такі відхилення можуть слугувати індикаторами початку відмов. Виявлення несправностей є першим та критично важливим етапом в системах PHM, які працюють на основі даних. Розроблена в статті модель для автоматизованого виявлення спектральних аномалій у деградації дизелів морських суден, незалежно від типу несправності, ґрунтується на автоенкодері із подавленням шуму (Denoising Autoencoder (DAE)), який навчається на попередньо оброблених даних нормальної експлуатації. Навчання DAE полягає в пошуку оптимальних параметрів кодувальника та декодувальника, які мінімізують функцію втрат. Важливим аспектом є те, що DAE навчається на зашумлених версіях даних, що допомагає видобувати стійкі та інформативні ознаки. Потім навчена модель DAE використовується для розрахунку швидкості та прискорення оцінки аномалії на кожному часовому кроці в даних з деградацією в разі несправності. Одночасно встановлюються загальні та динамічні порогові значення. Розрахунки та порогові значення динамічно змінюються з часом. Це дозволяє виконувати виявлення несправностей в режимі онлайн. Запропонована модель продемонструвала високу ефективність у виявленні трьох типів несправностей дизелів морських суден: засмічення повітряного фільтра, несправності турбокомпресора та несправності вентилятора із частотним керуванням. Модель може використовуватися для виявлення несправностей в режимі онлайн, що дозволяє вчасно вживати заходів для їх усунення. Модель може бути використана для виявлення несправностей в режимі реального часу, що дозволяє вчасно приймати заходи для їх усунення. Модель має перспективи для

застосування в практичних системах PHM дизельних двигунів. Однак, для подальшого розвитку, необхідно вирішити наступні завдання: автоматизація маркування даних для як класифікації несправностей, так і передбачення залишкового ресурсу, аналіз кореневої причини несправностей та їх ізоляція. Вирішення цих завдань сприятиме підвищенню ефективності та точності моделі.

***Ключові слова**: автоматизоване виявлення, спектральні аномалії, несправність, автоенкодер, приглушення шуму, технічне обслуговування, умови експлуатації за технічним станом, надійність, безвідмовність, відмова, технічний стан, засіб водного транспорту, призначений ресурс, процес, експлуатація, суднове обладнання, річковий та морський транспорт*

Постановка проблеми. Прогнозування та управління станом (Prognostics and health management (PHM)) є областю досліджень з великим потенціалом для вдосконалення операцій з технічного обслуговування суден для забезпечення безперервної роботи (у тому числі в умовах експлуатації за технічним станом). Система PHM, керована даними, виходить за рамки традиційних методів технічного обслуговування, таких як реактивне та планове технічне обслуговування, які в даний час використовуються на борту суден. Система використовує алгоритми, засновані на даних датчиків, для автоматичного виявлення несправностей, ідентифікації несправностей, їх класифікації та прогнозування залишкового терміну служби (remaining useful life (RUL)). Це дає можливість розробити оптимальний графік технічного обслуговування, спрямований на запобігання збоїв. Судна, в свою чергу, передають дані в режимі реального часу з оперативних датчиків в центр дистанційного управління для здійснення відповідних дій всередині системи PHM, на основі даних. Це дозволяє планувати операції з технічного обслуговування до найближчого відповідного порту. Оптимальне планування технічного обслуговування значно підвищує безвідмовність, експлуатаційну готовність, надійність і безпеку системи.

Методи виявлення аномалій спрямовані на виявлення відхилень від типового функціонування. З точки зору системи PHM, який оперує даними, такі відхилення можуть служити індикаторами зароджуються збоїв. Виявлення несправностей є першим і критичним кроком у системах PHM, керованих даними. Цей процес повинен виконуватися автоматично, щоб визначити момент часу, коли виникає несправність, на основі даних про деградацію. Крім того, цей момент часу може бути використаний для створення етикеток для класифікації несправностей і визначення залишкового терміну служби. В останні роки спостерігається підвищений інтерес до методів виявлення спектральних аномалій. Вони спрямовані на створення низькорозмірного представлення вхідних даних, де аномалії та типові дані про продуктивність зазвичай легко розрізняються. Помилка відновлення на кожному часовому кроці між вихідними даними та їх низьковимірним відновленням використовується як показник аномалії для виявлення невідповідностей. Аналіз головних компонент є одним з найбільш відомих класичних методів виявлення спектральних аномалій. Однак останнім часом з'явилися глибокі нейронні мережі (deep neural networks (DNNs)), які продемонстрували більшу ефективність у цій сфері.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даний час розглядаються три підходи до навчання алгоритмів виявлення спектральних аномалій: супервізорний, напівсупервізорний і неконтрольований. Вибір методу навчання залежить від наявності та якості вхідних даних. Диспетчерське навчання включає навчання класифікатора, який може відрізнити нормальну роботу від несправностей. Цей спосіб ефективний, якщо є мітки для нормальних і помилкових даних. Наприклад, у статті [1] запропонована супервізійна нейронна мережа для виявлення несправностей у судновому обладнанні. У [2] розроблено метод онлайн-діагностики несправностей на основі згорткових нейронних мереж та передачі знань. Система була навчена з використанням методу нагляду, який класифікує несправності підшипників і насосів. Однак у морській галузі часто відсутні мічені дані про несправності. У таких випадках необхідно використовувати методи напівнагляду і без нагляду. Напівсупервізійне навчання використовує лише дані нормальної роботи. Наприклад, у [3] і [4] варіаційний автокодер використовувався

для виявлення аномалій. У цих дослідженнях було оцінено максимальне прискорення даних про несправності та використано як детектор несправностей. Однак цей підхід дозволяє виявляти несправності лише в автономному режимі, оскільки для визначення максимального прискорення потрібні заздалегідь відомі дані про несправності. Навчання без учителя не вимагає заздалегідь визначених міток і ґрунтується виключно на внутрішніх характеристиках даних. Наприклад, в [5] детектор аномалій заснований на варіаційному автоенкодері з використанням LSTM. Пошук в Інтернеті стає можливим завдяки зміні порогового значення залежно від оціненого статусу завдання. Такий підхід дозволяє адаптувати порогові значення в режимі реального часу.

Метою статті є автоматизація процесу виявлення аномалій, пов'язаних з деградацією суднових дизельних двигунів на базі автоенкодера з шумовідведенням.

Викладення основного матеріалу дослідження. У статті запропоновано модель автоматизованого виявлення спектральних аномалій при деградації суднових дизельних двигунів судна незалежно від типу несправності. В якості глибокої нейронної мережі був обраний автоенкодер з видаленням шумів (Denoising Autoencoder (DAE)), оскільки вона перевершує інші мережі з точки зору виявлення несправностей морських компонентів на основі відновлення.

DAE – це тип штучної глибокої нейронної мережі під назвою DNN, яка використовується для дослідження прихованих представлень даних і відновлення «чистих» даних із зашумлених вхідних даних [7-8]. Основною метою DAE є добувати інформацію, ігноруючи шум або непотрібні деталі в даних. Основні характеристики DAE:

1. В основі DAE лежить концепція автоенкодера. Автокодер – це тип нейронної мережі, який складається з двох основних частин: кодера (енкодера) і декодера. Кодувальник стискає вхідні дані в приховане представлення (код), а декодер відновлює дані з цього коду. Узагальнена архітектура DAE наведена на рис. 1.

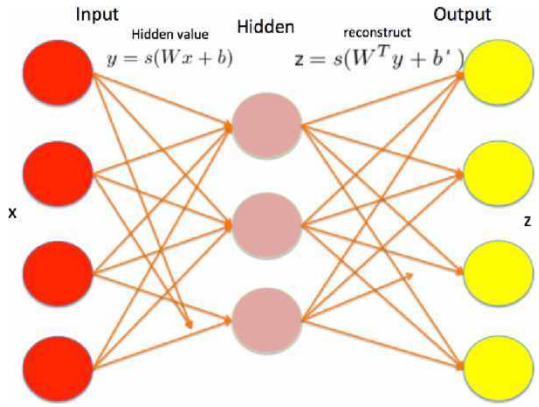


Рисунок 1 – Узагальнена архітектура Denoising Autoencoder
Джерело: M. Chen, Z. Xu, K. Weinberger, and F. Sha, 2012

2. DAE має специфічну особливість: перед подачею даних на вхід мережі вхідні дані піддаються штучному шуму. Це може бути додавання випадкового шуму, спотворення, видалення деяких даних тощо.

3. Мережа навчена на зашумлених вхідних даних, але метою навчання є відновлення «чистих» даних, тобто даних без шумів. У процесі навчання мережа налаштовується таким чином, щоб мінімізувати різницю між шумними входами та їх відновленими версіями.

4. Важливою особливістю DAE є те, що латентне представлення (код), яке мережа витягує в процесі навчання, є ефективним набором функцій даних, який ігнорує шуми та зайві деталі.

У цілому основними сферами застосування DAE є:

– зменшення розмірності: DAE можна використовувати для зменшення розмірності даних шляхом вилучення найважливіших ознак;

– фільтрація шуму: DAE можна використовувати для фільтрації шуму з даних, що корисно в завданнях, пов'язаних з шумом або артефактами;

– відновлення даних: DAE може відновити пошкоджені дані, такі як зображення, після артефактів або спотворень.

Математичний опис DAE містить у собі такі компоненти:

1. Кодувальник, який перетворює вхідні дані у внутрішнє або приховане представлення. Нехай x позначає вхідні дані, а h – прихований вид. Тоді кодувальник можна представити таким чином:

$$h = f_{encoder}(x), \quad (1)$$

де $f_{encoder}$ – функція-енкодер, яка може бути реалізована у вигляді нейронної мережі з одним або декількома шарами.

2. Декодер (Decoder), який перетворює латентне представлення назад в спробу відновити вихідні, «чисті» дані. Нехай x' позначає вихід декодера. При цьому декодер можна представити так:

$$x' = f_{decoder}(h), \quad (2)$$

де $f_{decoder}$ – функція декодера також може бути реалізована у вигляді нейронної мережі.

3. Функція втрат (Loss Function). Мета DAE – мінімізувати різницю між вихідними даними та їх відновленими версіями. Це досягається шляхом визначення функції втрат, яка вимірює похибку відновлення. Однією з поширених функцій втрат є середньоквадратична похибка (Mean Squared Error, MSE):

$$[L(x, x') = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_i')^2 \quad (3)$$

де N – кількість елементів у вхідних даних;

x_i – i-ий елемент вхідних даних;

x_i' – i-ий відновлений елемент даних.

Навчання DAE полягає в пошуку оптимальних параметрів кодера і декодера, які мінімізують функцію втрат. Важливим аспектом є те, що DAE навчається на зашумлених версіях даних, що допомагає їй отримувати надійні та інформативні функції.

Розглянемо докладніше процес навчання моделі виявлення спектральних аномалій за допомогою DAE. У контексті виявлення аномалій DAE може бути використаний для вивчення нормального функціонування системи та виявлення аномалій, які можуть вказувати на аномалії. Алгоритм навчання DAE розглядається з точки зору моделі виявлення спектральних аномалій деградації суднових дизельних двигунів судна і складається з таких етапів (рис. 2):

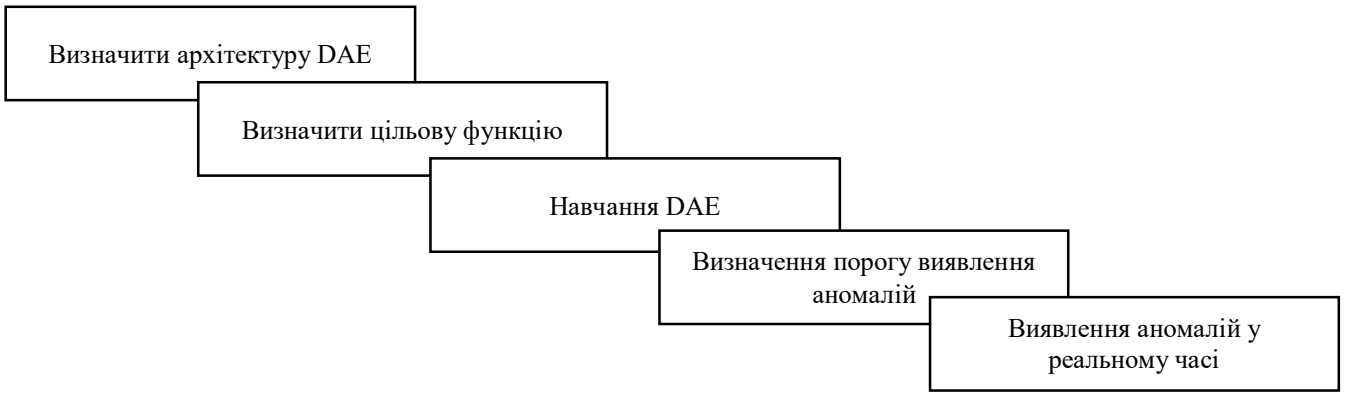


Рисунок 2 – Узагальнений алгоритм навчання автоенкодера з точки зору моделі виявлення спектральних аномалій деградації суднових дизельних двигунів судна
Джерело: узагальнено автором

1. Визначення архітектури DAE, яка складається з двох основних частин: кодера і декодера. Кодувальник стискає вхідні дані у прихованому вигляді, а декодер відновлює дані з цього подання. Архітектура DAE визначається як функція кодера і декодера.

2. Визначення цільової функції DAE. Основна ідея DAE полягає у відновленні вхідних даних із «зашумлених» даних. Для цього використовується цільова функція, яка мінімізує різницю між вихідними даними та їх відновленими версіями. Цільова функція DAE визначається наступним чином. Нехай вихідні дані позначаються як X, і зашумлені дані, як X'. Тоді цільова функція DAE (J) зводиться до мінімуму наступним чином:

$$J(\theta) = ||X - D(E(X'))||, \quad (4)$$

де θ – параметри моделі DAE;

$E(X')$ – кодувальник, який перетворює зашумлені дані 3. Навчання DAE. Процес навчання DAE полягає в знаходженні оптимальних параметрів моделі (θ), мінімізуючи цільову функцію J. Це досягається за допомогою такого алгоритму оптимізації, як стохастичний градієнтний спуск (SGD). Навчання на тему «чисті дані». На етапі навчання DAE використовується набір даних, що містить «чисті» приклади нормального функціонування суднового дизельного двигуна. Ці дані схильні до випадкового додавання шуму, створюючи зашумлені дані X'. DAE навчається на зашумлених даних для відновлення даних «чистих даних» X.

4. Визначення порогу для виявлення аномалій. Після завершення навчання DAE визначається поріг виявлення аномалій. Якщо різниця між вхідними даними та їх відновленими версіями перевищує встановлений поріг, то це вважається аномалією.

5. Виявлення аномалій у реальному часі. У режимі реального часу DAE може бути застосований до даних про продуктивність суднових дизельних двигунів. Якщо помилка відновлення перевищує встановлений поріг, це сигналізує про можливу аномалію в роботі двигуна.

У даній статті для перевірки пропонованої моделі використовуються два види несправностей: засмічення повітряного фільтра і вихід з ладу турбокомпресора. Несправність повітряного фільтра імітується обмежувачем, який поступово переходить з повністю відкритого положення в закрите на 90%. Це призводить до зменшення подачі повітря в турбокомпресор. Несправність турбокомпресора імітується пристроєм для зливу повітря, який встановлюється на магістралі подачі повітря між турбокомпресором і впускним колектором двигуна. Поступове зливання повітря призводить до зниження тиску повітря в процесі згоряння двигуна. Третій тип несправності використовується для остаточної перевірки запропонованого алгоритму: несправність частотно-регульованого вентилятора, керуючого вторинною системою охолодження двигуна. Забитий повітряний фільтр зменшує кількість повітря, що надходить у двигун. Це може призвести до меншої потужності двигуна та підвищеної витрати палива. Несправний турбокомпресор також може призвести до зниження потужності двигуна та підвищеної витрати палива. Несправність частотно-регульованого вентилятора може призвести до перегріву двигуна.

Таким чином, робота моделі автоматизованого виявлення спектральних аномалій деградації суднових дизелів на базі автоенкодера з шумозніманням може бути зведена до такого. По-перше, DAE навчається на попередньо оброблених даних про нормальну роботу. Потім навчена модель DAE використовується для обчислення швидкості та прискорення оцінки аномалії на кожному часовому кроці в даних зі зниженням у разі збою. Одночасно встановлюються узагальнені і динамічні пороги. Розрахунки та порогові значення динамічно змінюються з часом. Це дозволяє виконувати виявлення несправностей в режимі онлайн, оскільки несправність виявляється автоматично, як тільки розрахунки швидкості та прискорення перевищують порогові значення.

Висновки. У статті запропоновано модель автоматизованого виявлення спектральних аномалій деградації суднових дизельних двигунів, яка не залежить від типу відмови. DAE використовується як глибока згорткова мережа. Для тестування моделі було використано три типи несправностей з різними моделями деградації. Дані про нормальну експлуатацію та помилкові дані про деградацію були зібрані з двох різних профілів навантаження двигуна. Ці профілі призначені для відтворення реальних ситуацій, які можуть вплинути на продуктивність суднових дизельних двигунів. Модель показала високу ефективність у виявленні всіх трьох типів несправностей. Слід зазначити, що виявлення несправностей – це лише перший крок, який необхідно виконати в реальній PHM-системі, керованій даними. Для подальшого аналізу несправностей необхідно виконати, по-перше, автоматичне маркування даних для врахування як класифікації несправностей, так і прогнози RUL, по-друге, аналіз першопричин несправності та ізоляції несправностей. Ці дії розглядаються як напрями подальших досліджень.

REFERENCES

1. G. Wu, "Fault detection method for ship equipment based on BP neural network", *Proc. Int. Conf. Robots Intell. Syst. (ICRIS)*, pp. 556-559, May 2018.

2. G. Xu, M. Liu, Z. Jiang, W. Shen and C. Huang, "Online fault diagnosis method based on transfer convolutional neural networks", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 2, pp. 509-520, Feb. 2020.

3. A. L. Ellefsen, E. Bjørlykhaug, V. Æsøy and H. Zhang, "An unsupervised reconstruction-based fault detection algorithm for maritime components", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16101-16109, 2019.

4. A. L. Ellefsen, X. Cheng, F. T. Holmeset, V. Æsøy, H. Zhang and S. Ushakov, "Automatic fault detection for marine diesel engine degradation in autonomous ferry crossing operation", *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. (ICMA)*, pp. 2195-2200, Aug. 2019.

5. D. Park, Y. Hoshi and C. C. Kemp, "A multimodal anomaly detector for robot-assisted feeding using an LSTM-based variational autoencoder", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 1544-1551, Jul. 2018.

6. A. Budiman, M. I. Fanany and C. Basaruddin, "Stacked Denoising Autoencoder for feature representation learning in pose-based action recognition," 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Tokyo, Japan, 2014, pp. 684-688, doi: 10.1109/GCCE.2014.7031302.

7. A. Coates, H. Lee, and A. Ng, An analysis of single-layer networks in unsupervised feature learning, in Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, ser. JMLR Workshop and Conference Proceedings, G. Gordon, D. Dunson, and M. Dudk, Eds. JMLR W&CP, pp. 215-223.

8. M. Chen, Z. Xu, K. Weinberger, and F. Sha, Marginalized denoising autoencoDers for domain aDaptation, in Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning (ICML-12), ser. ICML 12, J. Langford and J. Pineau, Eds. New York, NY, USA: ACM, July 2012, pp. 767-774.

Dubynets O.I.

MODEL FOR AUTOMATED DETECTION OF SPECTRAL ANOMALIES IN THE DEGRADATION OF MARINE DIESEL ENGINES USING A DENOISING AUTOENCODER

The aim of this article is to automate the process of detecting anomalies associated with the degradation of marine diesel engines using a denoising autoencoder (DAE). The methods for anomaly detection are focused on identifying deviations from typical engine operation. From a Prognostics and Health Management (PHM) system perspective, such deviations can serve as indicators of impending failures. Detecting faults is the initial and critically important stage in data-driven PHM systems. The developed model in this article for automated spectral anomaly detection in the degradation of marine diesel engines, irrespective of the fault type, is based on a denoising autoencoder (DAE). The DAE is

trained on preprocessed data from normal engine operation. DAE training aims to find optimal encoder and decoder parameters that minimize a loss function. An important aspect is that the DAE is trained on noisy data, aiding in extracting robust and informative features. Subsequently, the trained DAE model is used to calculate the speed and acceleration of anomaly assessment at each time step in degradation data in the event of a fault. Generic and dynamic threshold values are simultaneously established. These calculations and threshold values dynamically change over time, enabling real-time fault detection. The proposed model has demonstrated high efficiency in detecting three types of faults in marine diesel engines: air filter clogging, turbocharger malfunction, and frequency-controlled fan faults. The model can be used for online fault detection, facilitating timely corrective actions. It holds promise for practical use in PHM systems for marine diesel engines. However, further development tasks include automating data labeling for both fault classification and Remaining Useful Life (RUL) predictions, as well as analyzing the root cause of faults and isolating them. Solving these tasks will enhance the model's effectiveness and accuracy.

***Keywords**: automated detection, spectral anomalies, marine diesel engines, fault, auto-encoder, noise suppression, maintenance, operating conditions by condition, reliability, failure, technical condition, means of water transport, technical condition, means of water transport, designated resource, process, operation, ship equipment, river and sea transport*

УДК 656.61.084 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.12

Нікітін П.В., Гусак І.А.

МЕТОД УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ВИКОНАННІ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Метою цієї статті є підвищення безпеки морських перевезень вантажів шляхом розробки та удосконалення методів оцінки та управління ризиками надзвичайних ситуацій. Дана стаття акцентує увагу на актуальності розробки та впровадження методу управління ризиками, пов'язаними з виникненням надзвичайних ситуацій під час морських перевезень. Незважаючи на значний науково-технічний прогрес у галузі безпеки мореплавства, частота аварій залишається високою. Основною метою є забезпечення безпеки під час морських перевезень та зменшення негативних факторів, що сприяють виникненню надзвичайних ситуацій. Поточне дослідження виявляє, що кількість інцидентів під час морських перевезень залишається високою та недостатньо зменшується. Аналіз практик підготовки та здійснення морських перевезень підкреслює, що підходи до оцінки та управління ризиками залишаються традиційними, і наукове забезпечення питань безпеки недостатньо розробляється. Тобто, аналіз існуючого досвіду та досліджень вказує на неповний розвиток наукових основ оцінки та управління ризиками в контексті морських перевезень вантажів. Методи оцінки ризиків надзвичайних ситуацій, а також оцінки безпеки та ефективності проектів транспортно-логістичних систем на основі критеріїв ризику потребують додаткової розробки. Питання прийняття рішень в управлінні ризиками також залишаються недостатньо дослідженими. Таким чином, дана стаття представляє інноваційний метод управління ризиками надзвичайних ситуацій на морських перевезеннях. Основною перевагою є інтегральний підхід, який дозволяє оцінити ризик на різних етапах перевезень вантажів. Цей метод базується на системному аналізі, детально розглядаючи ризики на кожному ланцюжку транспортно-логістичної системи. Такий підхід забезпечує більш точну оцінку можливих ризиків та дозволяє приймати

рішення щодо забезпечення безпеки на ранніх етапах проектування. Використання даного методу також сприяє зменшенню числа необґрунтованих ризикованих рішень, що дає можливість транспортним компаніям, власникам вантажів, морякам та власникам суден приймати додаткові заходи для забезпечення безпеки морських перевезень та зниження ймовірності аварійних ситуацій та їх наслідків.

***Ключові слова**: метод управління ризиками, надзвичайні ситуації, морські перевезення, безпека, інтегральний аналіз, транспортно-логістичний ланцюг, оцінка ризику.*

Постановка проблеми. Розробка та впровадження методу управління ризиками надзвичайних ситуацій у морських перевезеннях має високу актуальність для забезпечення безпеки. Незважаючи на науково-технічний прогрес в області безпеки мореплавання, частота аварій залишається на високому рівні. Основним завданням при морських перевезеннях є забезпечення безпеки. Важливо зменшувати вплив негативних факторів, що спричиняють виникнення надзвичайних ситуацій.

Проте кількість інцидентів у морських перевезеннях все ще залишається високою і не зменшується в достатній мірі. Аналіз існуючих практик підготовки та здійснення морських перевезень показує, що підходи до оцінки та управління ризиками залишаються традиційними, і у розробці транспортно-логістичних систем недостатньо уділяється уваги науковому забезпеченню питань безпеки.

Проте аналіз існуючого досвіду та досліджень в галузі забезпечення безпеки перевезень вказує на недостатньо повний розвиток наукових основ оцінки та управління ризиками в контексті морських та мультимодальних вантажоперевезень. Методи комплексної оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій у цих галузях, а також оцінки безпеки та ефективності проектів транспортно-логістичних систем на основі критеріїв ризику залишаються недостатньо розробленими. Питання прийняття рішень у контексті управління ризиками також залишаються мало вивченими.

Все вищевказане визначає суперечність, коли, з одного боку, існує необхідність в посиленні безпеки та ефективності морських перевезень, а з іншого боку, теоретичні дослідження питань забезпечення безпеки в умовах невизначеності розвитку надзвичайних ситуацій залишаються недостатньо розробленими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день, значна кількість досліджень присвячена підвищенню безпеки на морі та оцінки ризиків надзвичайних ситуацій [1-11].

Наприклад, у статті [1] зазначено, що в минулому морська галузь досить успішно зменшувала кількість великих аварій. Щоб продовжити цю тенденцію у майбутньому, необхідно внести певні інновації у попередні показники ризику. При правильному розробленні вони дозволяють визначити та оцінити існуючі ризики для судна та екіпажу в майбутньому, що, в свою чергу, дозволяє приймати пом'якшувальні заходи до того, як станеться небажана подія. Прямо зараз на можливість розробки таких попередніх показників ризику позитивно впливає тривала цифрова трансформація в морській галузі. По мірі того, як стає доступним все більше даних про роботу суден, їх можна використовувати в інноваційних рішеннях з управління ризиками. Поєднуючи ідею попередніх показників ризику з методами управління ризиками на основі даних та алгоритмів, цим документом спочатку встановлюється структура розробки моделей морських ризиків на основі даних, пов'язаних з безпекою, зібраних на борту. Структура розробки застосовується для перевірки концепції, де використовується інноваційний підхід, заснований на машинному навчанні, для розрахунку провідного показника морського ризику. У загальному підсумку, результати підтверджують, що підхід, заснований на даних та алгоритмах, можна використовувати для визначення основного показника ризику для кожного судна, навіть незважаючи на те, що досягнута ефективність моделі ще не вважається задовільною, і заплановані подальші дослідження.

У статті [2] визначено, що катастрофічні екологічні, людські та фінансові втрати, пов'язані з аваріями з небезпечними вантажами, продовжують викликати серйозне занепокоєння серед посадових осіб морського транспорту. Фактори, що спричиняють ці аварії при роботі з небезпечними вантажами в порту, потребують ретельного аналізу та оцінки, які поки що перебувають на початковому етапі. Відповідно до цих переважаючих проблем, це дослідження спрямоване на оцінку багатофакторних ризиків, пов'язаних з роботою з небезпечними вантажами в порту. Запропонована методологія поєднує експертні оцінки та огляд літератури для виявлення факторів та встановлення їх причинно-наслідкових зв'язків, а також баєсовську мережу (BN) для висновків, заснованих на 348 попередніх звітах про аварії з 1990 по 2018 рік. Результати показують, що за нормальних обставин ймовірність аварії зі значними наслідками становить 0.598, при цьому люди та управління найбільше сприяють цим факторам. За наявності ознак аварії на навколишнє середовище та забруднення, ймовірність інциденту «управління» збільшується на 0.706. Був проведений аналіз чутливості для визначення найбільш критичних факторів аварії з небезпечним вантажем. Це дослідження показує, що для уникнення нещасних випадків з небезпечними вантажами та зменшення важкості наслідків портові влади, зацікавлені державні органи та інші відповідні установи повинні приділяти особливу увагу кваліфікації, навчанню та ставленню залученої робочої сили. Крім того, було виявлено, що розробка та впровадження жорстких протоколів безпеки мають вирішальне значення. Це дослідження має практичне значення для підвищення безпеки та зниження ризиків, пов'язаних з перевезенням небезпечних вантажів в порту.

У роботі [3] визначено, що, як інтерфейс між морем і сушею, порти піддаються впливу широкого спектра природних небезпек, таких як циклони, повені та цунамі. В той же час морські вантажі зростають як за обсягом, так і за вартістю. Крім їх вразливості до різних небезпек під час морської подорожі, їх концентрація в портах підвищує ризик для самого вантажу, а також для порту. Мета цієї статті подвійна. По-перше, дослідження пропонує рамки аналізу ризику катастроф для морських вантажів та портів, розкладаючи процес термінальної діяльності на частини. Це дозволяє більш глибокий аналіз, досліджуючи різні аспекти цього процесу. По-друге, дослідження формулює модель переходу станів для симуляції сценаріїв. Це інтегрована і надійна модель ризику для аналізу вразливості морських вантажів та портів до природних небезпек. Порт Лаем Чабанг обраний як приклад для демонстрації аналізу ризику симуляції. Виявлено, що втрати можуть бути як фізичними втратами/пошкодженням, так і втратами через перерви з великим накопиченням вантажу через розриви в роботі порту.

Метою статті є підвищення безпеки морських вантажоперевезень шляхом розробки та вдосконалення методів оцінки та управління ризиками надзвичайних ситуацій.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Метод управління ризиками надзвичайних ситуацій при здійсненні морських перевезень ґрунтується на застосуванні статистичної моделі безпеки перевезень морським транспортом та узагальненої моделі прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій (рис. 1).

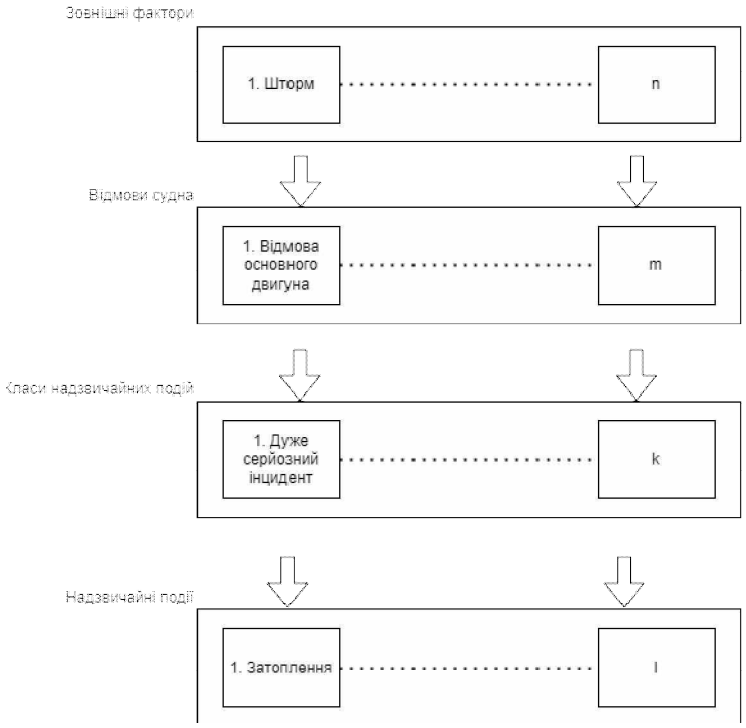


Рисунок 1. Узагальнена схема моделі прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій

Вивчення статистичної інформації надає можливість виявити характер послідовності випадкових подій, визначити рівняння тенденцій розвитку надзвичайних ситуацій та обрати конкретну модель, яка описує рівень безпеки вантажних перевезень шляхом обчислення числових значень показників ризику.

При цьому розглядається статистична модель безпеки вантажних перевезень в певний період часу, яка представляється постійним пуасонівським потоком подій. Тут досліджується ймовірність того, що протягом певного періоду часу τ відбувається k подій:

$$P\big(X(t,\tau)\big) = \frac{a^k e^{-a}}{k!}, \tag{1}$$

де P – імовірність настання події;

$X(t,\tau)$ – функція кількості випадкових надзвичайних ситуацій;

k – кількість надзвичайних ситуацій протягом розглянутого часу;

$a = \delta\tau$ – параметр, що залежить від інтервалу часу та кількості надзвичайних ситуацій;

δ – інтенсивність потоку надзвичайних ситуацій;

τ – розглядаємий інтервал часу (розмірність вибирається залежно від конкретної задачі).

Також варто відзначити, що загальний потік надзвичайних ситуацій у транспортній системі формується з індивідуальних потоків випадкових подій, пов'язаних з різними причинами та транспортними маршрутами як на суходолі, так і на морі. Це дозволяє застосовувати основні принципи теорії потоків. Крім того, сума незалежних пуасонівських потоків також буде пуасонівським потоком.

При розробці методу управління ризиками надзвичайних ситуацій при морських перевезеннях враховуються такі обмеження та припущення:

– виникнення та розвиток надзвичайних ситуацій відбувається згідно з заданою послідовністю етапів, зображених на рис. 1;

– виникнення надзвичайних ситуацій та подальших подій розглядається як послідовність взаємовиключних подій (A_j^l) та спільних подій (B_i).

До групи невзаємовиключних подій A_j^l входять такі: можливі відмови технічних систем j-го типу (де j = 1, 2, ..., J) на ділянці маршруту l (де l = 1, 2, ..., L), наприклад, основного двигуна. Ці відмови можуть бути джерелом, наприклад, зіткнень суден або, наприклад, аварійної посадки на мілину, але тільки одна подія A_j^l може призвести до однієї з надзвичайних ситуацій під час руху суден.

Події B_i – це взаємопов'язані події, одна з яких з певною ймовірністю може статися після настання події A_j^l. Іншими словами, подія B_i може призвести до зіткнення, аварійної посадки на мілину або спричинити інші наслідки, пов'язані з i-им типом негативних наслідків для судна.

Тоді ймовірність відмови j-го виду з i-им збитком $P(A_{ji}^l)$ будемо визначати як середньостатистичне значення відношення кількості транспортних засобів, які постраждали від надзвичайної ситуації через відмову j-го виду з i-им збитком в районах плавання l, до загальної кількості транспортних засобів, які проходять через ці райони

$$P(A_{ji}^l) = \frac{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}}{\sum_l N_l}. \quad (2)$$

Вагові оцінки відмов j-го виду з i-им збитком в районах плавання l розраховуються відповідно до виразу

$$\omega(A_{ji}^l) = \frac{\sum_l N_l}{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}}. \quad (3)$$

Оскільки джерела надзвичайних ситуацій встановлюються шляхом застосування експертних оцінок під час офіційного розслідування подій з транспортними засобами, ймовірності виникнення подій $P(A_{ji}^l)$ розглядаються як початкові ймовірності. В результаті, події A_j^l можна розглядати як набір гіпотез, які породжують відповідні події B_i.

Отже, якщо подія A_j^l сталася, то ймовірність гіпотез, які породжують події B_i, можна обчислити за допомогою теореми Байєса та виразу для перемноження ймовірностей

$$P(A_j^l|B_i) = \frac{P(A_j^l)P\left(B_i|A_j^l\right)}{\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L} P(A_j^l)P\left(B_i|A_j^l\right)}, \quad (4)$$

де $P(A_j^l)$ – гіпотеза A_j^l;

$P\left(B_i|A_j^l\right)$ – умовні ймовірності події B_i згідно з гіпотезою $P(A_j^l)$.

Провівши розрахунки для значень $P\left(B_i|A_j^l\right)$, можна визначити максимальне значення ймовірності, що допоможе визначити, які події A_j^l мають найбільший вплив на подію B_i.

Інтенсивність виникнення надзвичайних ситуацій протягом періоду T з різних причин, таких як відмови, екстремальні погодні умови та непередбачувані обставини, може бути обчислена на основі статистичних даних для кожної потенційно небезпечної області l з використанням наступного виразу:

$$\gamma_{\left(B_i|A_j^l\right)} = \frac{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}}{T_l}, \quad (5)$$

і на основі одного, проходячи по районах l

$$\gamma_{\left(B_i|A_j^l\right)}^{\sum S}\gamma_{\left(B_i|A_j^l\right)} = \frac{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}}{T_l \sum_l S_{lt}}, \quad (6)$$

де $\sum_l S_{lt}$ – кількість суден, що проходять через райони l за час T.

Тоді ймовірність виникнення надзвичайної ситуації може бути розрахована згідно з виразом

$$R(B) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} P(A_j^l) P\left(B_i | A_j^l\right). \quad (7)$$

Вартість ризику аварії, позначена як R_i^l, визначається як добуток ймовірності аварії $P\left(B_i | A_j^l\right)$ на оцінку потенційного збитку, виражену через інтеграл функції збитку відносно змінної l (функція збитку для одиниці транспортного засобу)

$$R_i^l = P\left(B_i | A_j^l\right) \int W_i^l dl. \quad (8)$$

Узагальнена структура методу управління ризиками надзвичайних ситуацій під час морських перевезень з урахуванням формул (1) - (8) наведена на рис. 2.

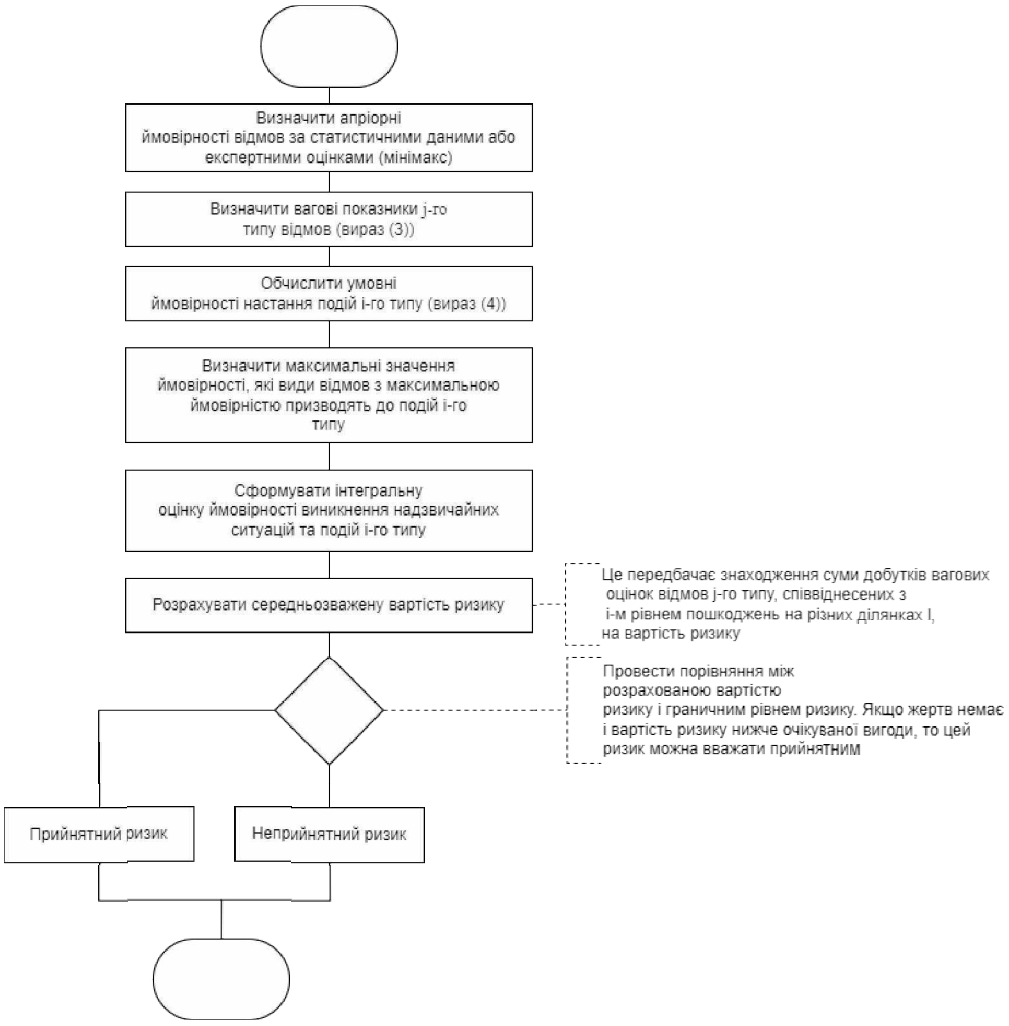


Рисунок 2. Узагальнена структура методу управління ризиками надзвичайних ситуацій під час морських перевезень

Отже, розроблений метод аналізує фактори та ризики на кожному етапі перевезення. Оцінка ризику надзвичайних ситуацій здійснюється для різних етапів, що дозволяє враховувати безпеку на ранніх стадіях проектування. Це допомагає оцінити рівень ризику для різних варіантів доставки та розглянути можливості зниження ризику. Маючи дані про ризик на різних

ділянках шляху, можна приймати більш обґрунтовані заходи безпеки, що зменшує ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій та завданого збитку.

Висновки. Таким чином, розроблений метод є інноваційним підходом, який дозволяє не лише оцінити рівень ризику, але й провести його комплексний аналіз на різних етапах вантажних перевезень. Однією з найважливіших особливостей цього методу є його інтегральний характер. На відміну від традиційних методів оцінки ризику, цей підхід ґрунтується на системному аналізі, в рамках якого докладно розглядаються та розраховуються ризики для кожного елемента, кожного етапу і кожного ланцюга транспортно-логістичної системи. Отже, забезпечується більш повне та точне уявлення про можливі ризики на кожному етапі перевезення. З використанням цього методу аналізуються фактори, які можуть вплинути на безпеку перевезень, а також виявляються фактори ризику. На основі цих даних здійснюється інтегральна оцінка ризику надзвичайних ситуацій. Це дозволяє на ранніх стадіях проектування транспортно-логістичних схем оцінити безпеку різних варіантів доставки вантажів та розглянути можливості зниження ризику до прийнятних значень. Крім того, використання цього методу сприяє зменшенню кількості необґрунтованих ризикових рішень. Це надає можливість транспортним компаніям, власникам вантажів, екіпажам суден та власникам суден приймати додаткові заходи для забезпечення безпеки перевезень, тим самим зменшуючи ймовірність виникнення аварійних ситуацій та їх потенційних наслідків.

REFERENCES

1. Kretschmann, L. Leading indicators and maritime safety: predicting future risk with a machine learning approach. J. shipp. trd. 5, 19 (2020). https://doi.org/10.1186/s41072-020-00071-1.

2. Khan RU, Yin J, Mustafa FS (2021) Accident and pollution risk assessment for hazardous cargo in a port environment. PLoS ONE 16(6): e0252732. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252732.

3. Gou, X., Lam, J.S.L. Risk analysis of marine cargoes and major port disruptions. Marit Econ Logist 21, 497–523 (2019). https://doi.org/10.1057/s41278-018-0110-3.

4. Balmat, Jean-Francois, et al. "MAritime RISk Assessment (MARISA), a fuzzy approach to define an individual ship risk factor." Ocean engineering 36.15-16 (2009): 1278-1286.

5. Hänninen, Maria, Osiris A. Valdez Banda, and Pentti Kujala. "Bayesian network model of maritime safety management." Expert Systems with Applications 41.17 (2014): 7837-7846.

6. Hanzu-Pazara, Radu, et al. "Reducing of maritime accidents caused by human factors using simulators in training process." Journal of Maritime Research 5.1 (2008): 3-18.

7. Wang, Jin. "Maritime risk assessment and its current status." Quality and Reliability Engineering International 22.1 (2006): 3-19..

8. Wang, J., et al. "Use of advances in technology for maritime risk assessment." Risk Analysis: An International Journal 24.4 (2004): 1041-1063.

9 Siddiqui, Atiq W., and Manish Verma. "Assessing risk in the intercontinental transportation of crude oil." Maritime Economics & Logistics 20 (2018): 280-299.

10. Roumboutsos, Athena, Nikitas Nikitakos, and Stefanos Gritzalis. "Information technology network security risk assessment and management framework for shipping companies." Maritime Policy & Management 32.4 (2005): 421-432.

11. Tanackov, Ilija, et al. "Risk distribution of dangerous goods in logistics subsystems." Journal of Loss Prevention in the Process Industries 54 (2018): 373-383.

Nikitin P., Husak I.

METHOD OF EMERGENCY RISK MANAGEMENT IN MARITIME TRANSPORT

The purpose of this article is to improve the safety of maritime transportation of goods by developing and improving methods for assessing and managing emergency risks. This article focuses

on the relevance of developing and implementing a method for managing risks associated with the occurrence of emergencies in maritime transportation. Despite significant scientific and technological progress in the field of maritime safety, the frequency of accidents remains high. The main goal is to ensure safety during maritime transport and reduce the negative factors that contribute to the occurrence of emergencies. The current study reveals that the number of maritime transport incidents remains high and is not sufficiently reduced. The analysis of the practices of preparing and carrying out maritime transport underlines that approaches to risk assessment and management remain traditional, and scientific support for safety issues is not sufficiently developed. In other words, the analysis of existing experience and research indicates that the scientific basis for risk assessment and management in the context of maritime transport of goods is incompletely developed. Methods for assessing emergency risks, as well as assessing the safety and efficiency of transport and logistics system projects based on risk criteria, need to be further developed. The issues of decision-making in risk management also remain insufficiently researched. Thus, this article presents an innovative method of managing the risks of maritime emergencies. The main advantage is an integral approach that allows to assess the risk at different stages of cargo transportation. This method is based on a systematic analysis, considering in detail the risks at each chain of the transport and logistics system. This approach provides a more accurate assessment of potential risks and allows for early decision-making on safety issues. The use of this method also helps to reduce the number of unreasonable risky decisions, which enables transport companies, cargo owners, seafarers and ship owners to take additional measures to ensure the safety of maritime transport and reduce the likelihood of accidents and their consequences.

Keywords: *risk management method, emergencies, maritime transport, safety, integrated analysis, transport and logistics chain, risk assessment.*

УДК 629.12.004:621.833.1.004.4 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.13

Савчук В.П., Зінченко Д.О., Кочетов Г.А., Дзигар А.К.

АНАЛІЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПІДШИПНИКІВ ШАТУНА СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДВИГУНА HYUNDAI HIMSEN H25/33 ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ З ДОПУСТИМИМИ ЗНАЧЕННЯМИ ЗАЗОРІВ БЕЗ РЕМОНТУ

Дана стаття присвячена визначенню впливу режимів навантаження та робочих зазорів на працездатність мотилевих та головних підшипників на прикладі суднового середньообертового дизеля Hyundai HiMSEN H25/33. Також важливим аспектом даного дослідження є аналіз безпечності роботи досліджуваних підшипників при складальних та граничних значеннях робочих зазорів. Приведено послідовність моделювання робочих процесів у підшипниках шатуна із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу GT-Suite. Встановлено характеристики робочих параметрів досліджуваних підшипників при роботі дизеля на найбільш вживаному режимі навантаження 75 % $N_{ен}$ та перевантажувальному режимі 110 % $N_{ен}$ при складальних та допустимих без ремонту робочих зазорах. Отримані результати комп'ютерного моделювання протікання робочих процесів у мотилевих підшипниках вказують на наявність стійкого режиму гідродинамічного мащення при всіх варіантах навантажень та робочих зазорів. Встановлено, що при найбільш несприятливих умовах експлуатації величина мінімальної товщини змащувального шару становить 10,2 мкм.

Дане значення є граничним для даного типу підшипників та відповідно є обґрунтованим. Максимальне значення тиску змащувального шару становить 226,4 МПа, що не перевищує межу міцності для алюмінієвих підшипникових матеріалів. У головних підшипниках граничний режим мащення має місце на тривалій ділянці відносно кута повороту колінчастого валу, що наближено становить 300 º – від початку робочого ходу та майже до кінця такту випуску. Режим граничного мащення в даному підшипнику зумовлений високим навантаженнями та малою швидкістю ковзання із зміною напрямку обертання при кожному оберті колінчастого валу. Збільшення робочого зазору також сприяє росту максимального тиску в змащувальному шару на 45 % (режим 75 % Nен) та 48 % (режим 110 % Nен). Максимальне значення тиску змащувального шару складає 507 МПа, що вказує на можливе перевантаження матеріалу підшипникового вузла.

Ключові слова: *робочий зазор, допустимий зазор без ремонту моделювання, підшипник, колінчастий вал, мащення.*

Вступ та постановка проблеми. Підшипники верхньої головки шатуна (головні підшипники) мають значні відмінності в конструкції та режимах навантаження від підшипників колінчастого валу. Головні підшипники працюють в умовах інтенсивних знакозмінних навантажень від сил інерції та тиску газів, при підвищених температурах в зоні контакту. Внаслідок коливального руху шатуна в даних підшипниках мають місце два режими мащення – гідродинамічне та граничне, які протягом циклу періодично змінюють один одного і їх можна порівняти за тривалістю [1, 2]. Оцінити ступінь зношеності даного трибовузла в процесі роботи двигуна без його розбирання практично неможливо. У зв'язку з цим, оцінка працездатності підшипників КШМ при різних умовах навантаження, технічного стану та параметрів моторної оливи є актуальним завданням.

Змінні умови експлуатації дизелів суттєво впливають на режими мащення головних підшипників та на їх безвідмовність. Тому важливо визначити припустимі значення параметрів, що забезпечують працездатність підшипникових вузлів: властивості змащувальних масел, температура, тиск, складальні та припустимі зазори без ремонту та ін.

Комп’ютерне моделювання є найбільш використовуваним методом теоретичного аналізу робочих процесів, що протікають в підшипниках ковзання ДВЗ. Даний метод реалізовано в спеціалізованих програмних комплексах (СПК), що за рахунок вбудованих шаблонів елементів КШМ та систем мащення здійснюють розрахунки показників робочих процесів із врахуванням максимально можливої кількості конструктивних параметрів, режимів навантаження та характеристик змащувальних матеріалів. Розрахунок режимів мащення в підшипниках ковзання ДВЗ зазвичай проводять в СПК із використанням розрахункової гідродинаміки CFD (computational fluid dynamics). До таких СПК відносять Ansys, AVL від AVL List GmbH , GT-SUITE від Gamma Technologies та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій вказує на значне зростання інтересу в розумінні взаємозв’язку між умовами експлуатації двигуна та його підшипників [3]. Дослідники активно звертають увагу на важливість правильного налаштування режимів навантаження для забезпечення надійної та ефективної роботи підшипникових вузлів [1-9]. Деякі з останніх досліджень фокусуються на використанні новітніх технологій моделювання та аналізу для прогнозування поведінки підшипників в різних умовах навантаження [10]. Крім того, дослідження також розглядають різні методики підвищення тривалості та ефективності роботи підшипників в умовах зміни технічного стану та навантаження двигуна [11]. Наголошується на важливості попереднього аналізу та прогнозування можливих ризиків зносу та визначення оптимальних стратегій обслуговування для забезпечення довговічності та ефективності роботи КШМ [12-14]. У більшості випадків використовують стандартні методи розрахунку, які не дають можливості враховувати зміну геометрії підшипника та зокрема особливостей конструкції оливорозподільних канавок в підшипниках та отворів у шийках колінчастого валу, що у свою чергу не дає загальної уяви про

умови роботи підшипника та не може бути використаним для інженерного аналізу працездатності підшипників КШМ ДВЗ.

Формулювання цілей статті. Забезпечення обмежень викидів оксидів азоту NO_x із випускними газами сучасних суднових ДВЗ призвело до зміни протікання робочих процесів, що безсумнівно вплинуло на характер навантаження їх підшипникових вузлів. Двигуни Hundai HiMSEN H25/33 відповідають нормам IMO Tier II завдяки вдосконаленому моделюванню та застосування циклу Міллера з метою оптимізації робочого процесу. Застосування вдосконаленої системи наддуву з новими високоефективними турбокомпресорами забезпечують зниження питомої витрати палива та нижчу температуру згоряння, що є критичним для формування викидів NO_x. З іншого боку, відмінність режимів навантаження, якості експлуатаційних матеріалів та технічного обслуговування призводять до суттєвої різниці показників безвідмовності підшипників КШМ. Такі фактори спонукають до адаптування конструкції підшипників до змінених робочих процесів у циліндрах дизелів та розроблення систем діагностування ДВЗ із можливістю визначення поточного технічного стану та його прогнозування.

Ціллю проведеного дослідження є визначення впливу режимів навантаження та робочих зазорів на працездатність мотилевих та головних підшипників на прикладі суднового середньообертового дизеля Hundai-HiMSEN H25/33. Також важливим аспектом даного дослідження є аналіз безпечності роботи досліджуваних підшипників при складальних та граничних значеннях робочих зазорів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження працездатності підшипників шатуна виконано за допомогою програмного додатку GT-ISE програмного пакету GT-SUITE. Даний програмний продукт є спеціалізованим та призначено для дослідження динаміки КШМ ДВЗ, гідродинамічних процесів в підшипниках ковзання, проектування та дослідження систем мащення та процесів, що проходять в деталях циліндро-поршневої групи (ЦПГ) [16, 17].

Для розрахунку сил, що діють на підшипники КШМ внаслідок дії сил інерції та дії сил тиску газів, використовуються шаблон *EngineCrankTrain*, до якого заносять дані про конструктивні особливості КШМ, значення маси та моментів інерції поршня та шатуна. Опорний об'єкт *Crank-Slider Inertia Objec*t зокрема містить інформацію про масу поршня і шатуна, а також момент інерції та центр маси шатуна та використовуються для обчислення інерційної складової діючих навантажень в підшипниках КШМ. Для визначення положення центру маси та моменту інерції шатуна відносно його центру маси в площині обертання та відповідно маси поршня та його моменту інерції в площині обертання шатуна нами здійснювалось шляхом твердотільного моделювання в системі CAD/CAE SolidWorks (рис. 1).

За результатами розрахунку було визначено:

– маса шатуна в зборі 98,5 кг;

– відстань від осі отвору в нижній голівці шатуна до центру маси шатуна у вертикальній площині (вісь Z) – 188 мм;

– момент інерції в площині обертання шатуна L_{xx} = 8,73 кг·м^2.

Значення маси поршня та його моменту інерції визначаєм аналогічним чином як для шатуна:

– маса поршня (40,3 кг) в зборі із поршневим пальцем (15 кг) 55,3 кг;

– відстань від осі отвору в бобишках поршня до центру маси у вертикальній площині (вісь Y) – 95 мм;

– момент інерції в площині обертання шатуна L_{zz} = 0,404 кг·м^2.

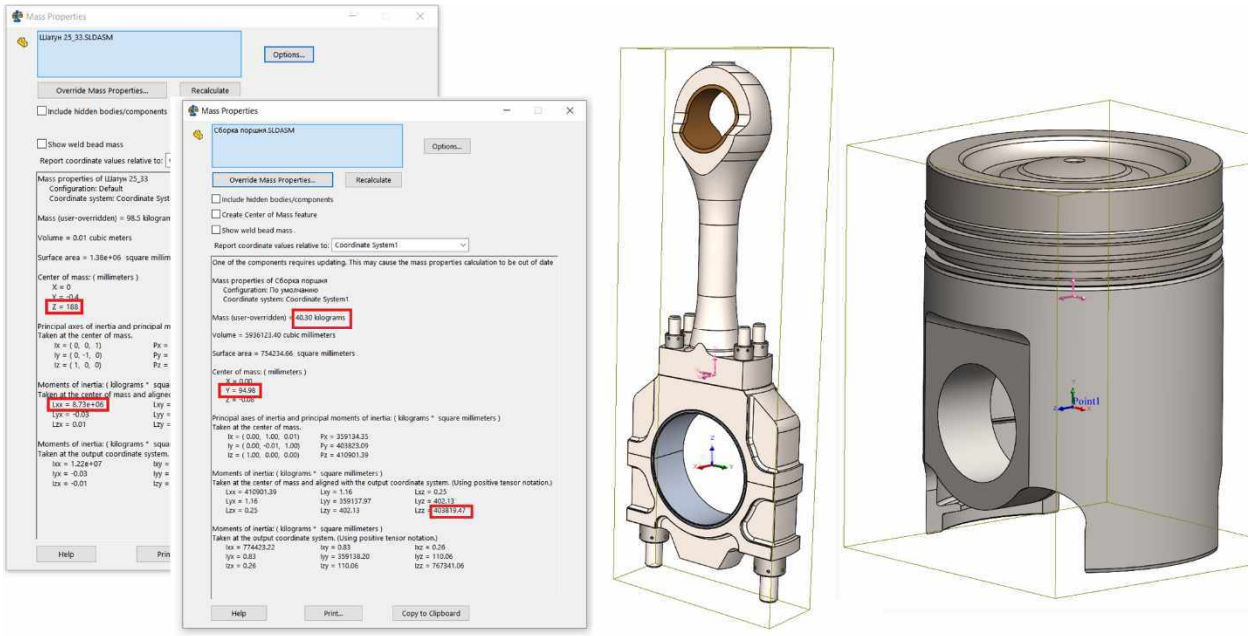


Рисунок 1 – Результати розрахунку положення центру маси та моменту інерції відносно центру маси шатуна та поршня

Призначення параметрів мотилевого підшипника. Для призначення показників мотилевого підшипника використовується шаблон *JounialBearingFlow*. Вкладка *Main* містить інформацію про розміри підшипника, радіальний зазор, особливості конструкції оливорозподільних канавок та отворів, а також пропонує вибрати метод гідродинамічного розрахунку підшипника.

Підшипник, що моделюється, має діаметр 230 мм та ширину 98 мм. Кутова протяжність та ширина оливорозподільної канавки становить 210 град та 18 мм відповідно. Діаметр оливорозподільних отворів становить 15 мм, а кутове розташування ± 90º по відношенню до вертикальної осі кривошипу. Значення параметрів підшипника, що вказано в шаблоні *JounialBearingFlow* показано на рис. 2. Кожна мотилева шийка має по два радіальних отвори діаметром 15 мм, що виготовлено під кутом 90 º до вертикальної осі кривошипу. Максимальний зазор в підшипнику без ремонту складає 0,5 мм.

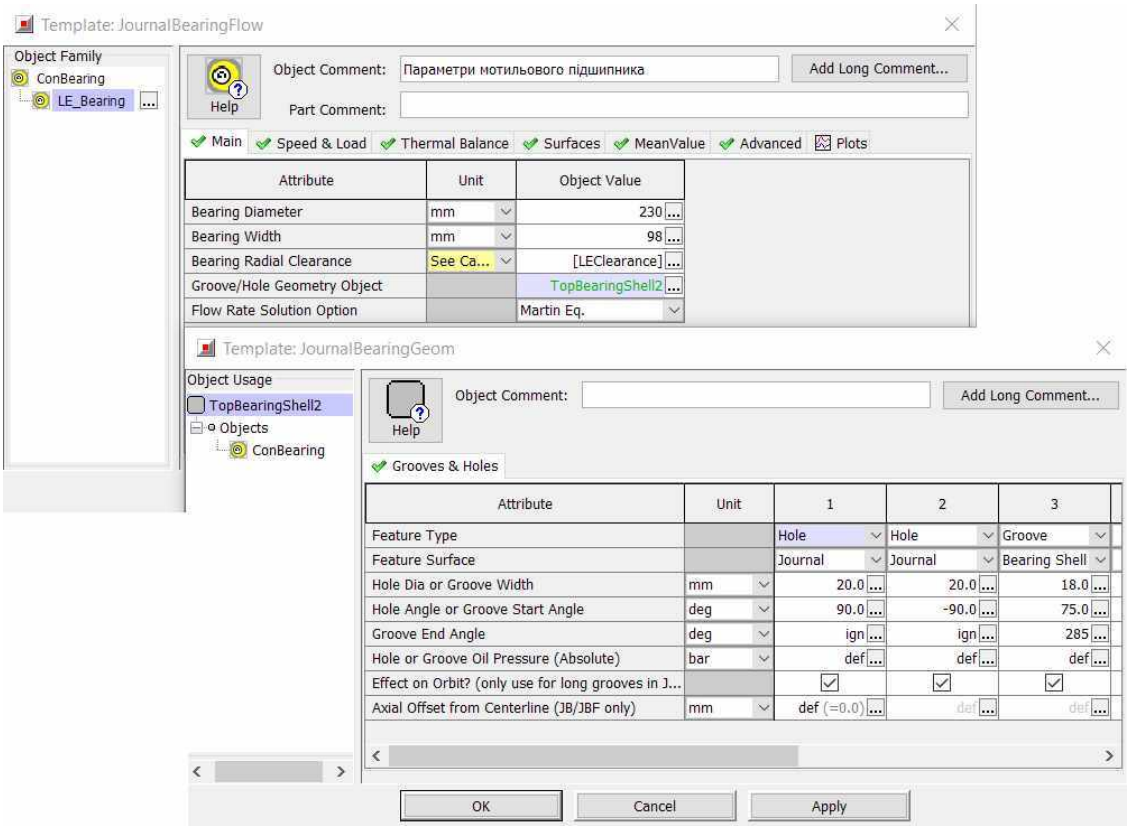


Рисунок 2 – Призначення показників мотилевого підшипника за допомогою шаблону *JounialBearingFlow*

Для поточного варіанту розрахунку мотилевого та головного підшипників застосовуємо метод Martin Eq.[15]. Цей метод використовують в мотилевих підшипниках і підшипниках з частковими канавками. У вкладці *Speed & Load* встановлюємо метод розрахунку Automatic – Engine Bearing, адже це дозволить програмі розрахувати навантаження підшипника в автоматичному режимі.

Для розрахунку теплового балансу підшипників використовуємо метод Quasi-steady (cycle). Він передбачає що лише потік оливи через підшипник поглинатиме тепло, що виділяється протягом даного циклу. Олива в контрольному об'ємові підшипника не враховується. Ця опція добре працює для підшипників із низьким підвищення температури, що зазвичай відбувається при низькій швидкості та високій температурі оливи [16].

Призначення параметрів підшипника верхньої головки шатуна. Призначення основних характеристик підшипника верхньої головки шатуна (головного підшипника) здійснюється аналогічно мотилевому. Підшипник має різну ширину: 68 мм в верхній, менш навантаженій частині та 118 мм в нижній. Особливості установки, та інші розміри підшипникового вузла представлено на рис. 3.

Для моделювання змінної ширини головного підшипника застосовано шаблон XYTable, що має назву WidthSE_Bearing. Вкладка даного шаблону представлена на рис. 4а.

Як видно із рис. 3, моторна олива через осьовий канал надходить до кільцевої канавки шириною 12 мм. Наявні радіальні отвори в підшипнику та осьова оливорозподільна канавка служать для подачі та розподілу оливи в підшипнику та, зокрема, для транспортування оливи через осьовий та радіальні канали до охолоджувальної порожнини поршня. Геометричні особливості оливорозподільної канавки даного підшипника вказано в шаблоні JournalBearingFlow. Загальний вигляд вкладок шаблонів приведено на рис. 4б.

Значення робочого радіального зазору в підшипнику визначаємо через посилання [SEClearance] до планувальника дослідження Case Setup. Це надає можливості уникнути

призначати значення робочого зазору в шаблоні при аналізі варіантів дослідження, що проводяться при їх змінених значеннях.

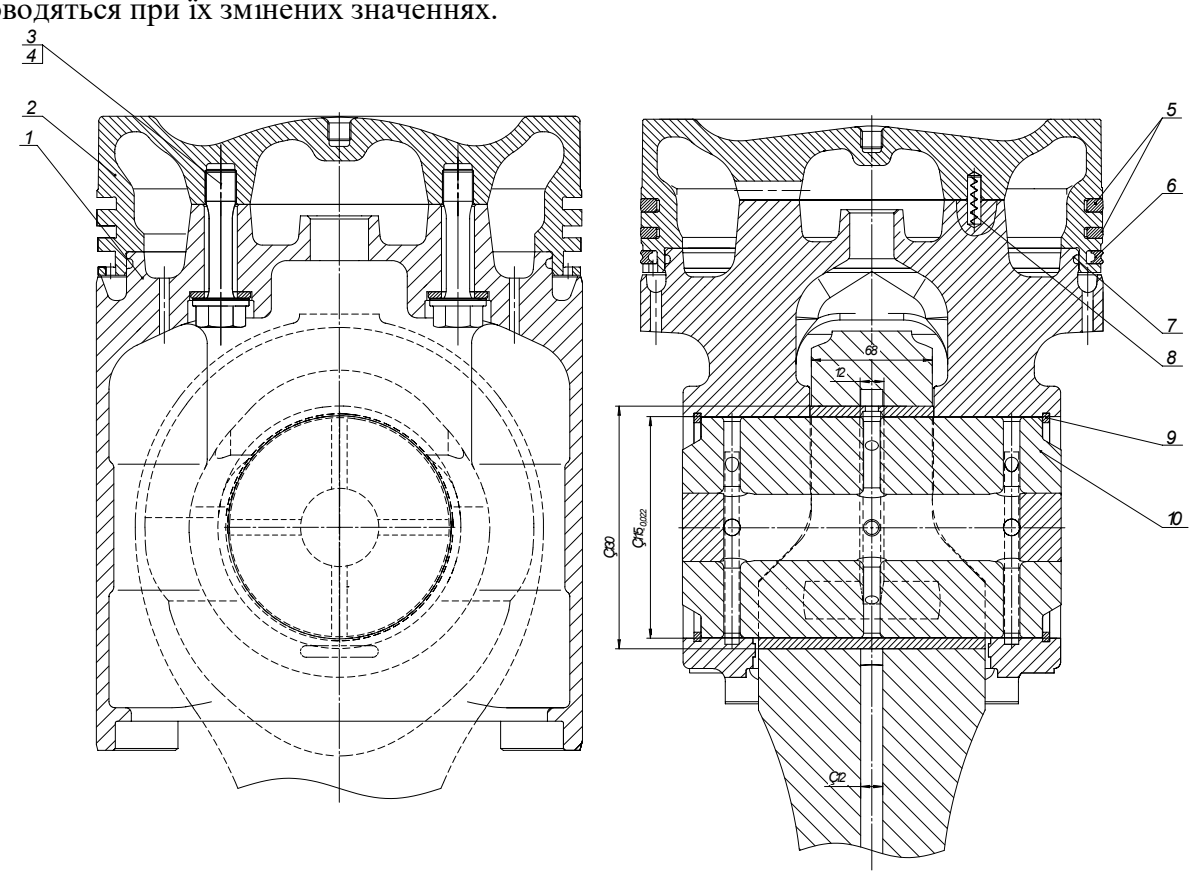
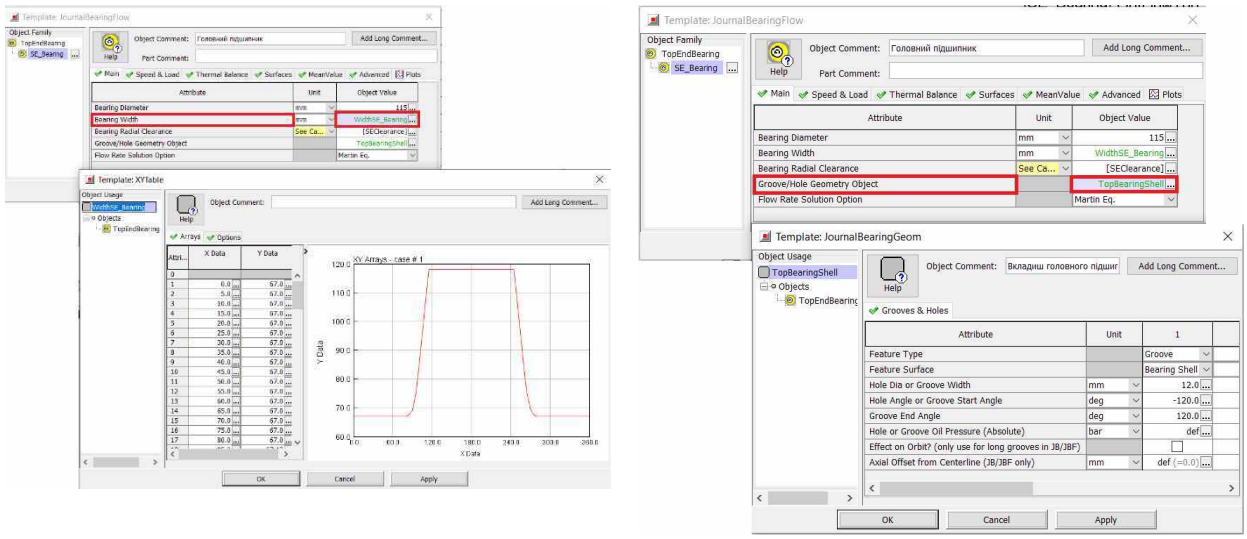


Рисунок 3 – Поршень в зборі: 1 – спідниця; 2 – головка; 3 – гвинт, 4 – шайба; 5 – кільця компресійні; 6 – кільце оливознімне; 7 – кільце ущільнювальне; 8 – штифт; 9 – кільце стопорне; 10 – палець



а б

Рисунок 4 – Призначення змінної ширини підшипника верхньої головки шатуна (а) та параметрів оливорозподільної канавки підшипника верхньої головки шатуна за допомогою шаблону *JournalBearingGeom* (б)

Налаштування 1D-карти моделі. Розташовуємо всі об’єкти на карті і з’єднуємо їх за допомогою лінків (рис. 5).

Об’єкт HiPress-1 описує параметри напірної магістралі:

– тиск (абсолютний) перед підшипником 5 бар;
– температура оливи на вході в підшипник 46 °С;
– властивості рідини – моторна олива Oil-SAE40-126-13cSt.

Інші два об’єкти OutFlow-LE та OutFlowTop шаблону EndEnvironmen характеризують умови навколишнього середовища, куди витікає моторна олива:
– тиск (абсолютний) 1 бар;
– температура навколишнього середовища (оливи) 90 °С;
– властивості рідини – як і для попереднього об’єкту, моторна олива Oil-SAE40-126-13cSt.

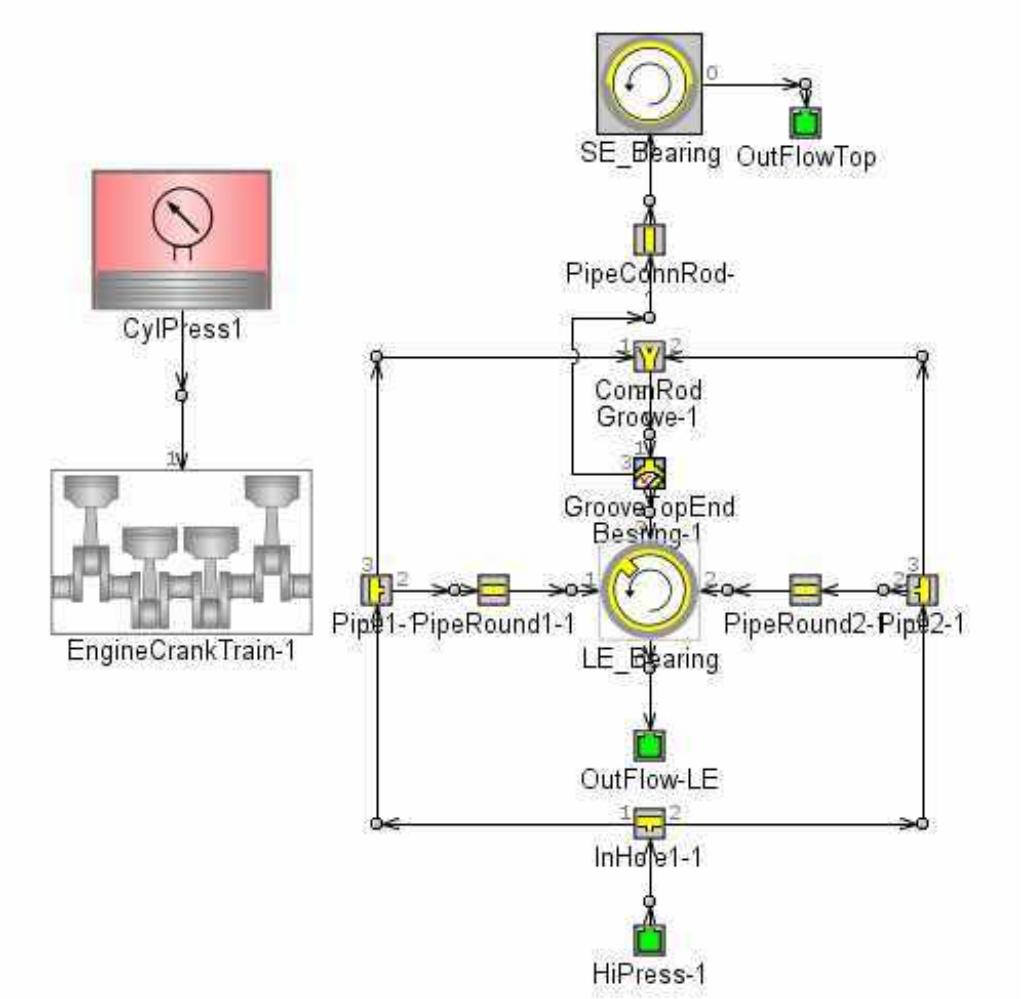


Рисунок 5 – Карта 1D моделі контуру змащування підшипників шатуна

Аналіз результатів розрахунку робочих параметрів підшипників шатуна в змінних умовах експлуатації. Дослідження робочих процесів мотилевого та головного підшипників здійснювалось для двох варіантів протікання робочого процесу в циліндрі двигуна: для режимів 75 % та 110 % $N_{ен}$ при частоті обертання колінчастого валу 750 хв$^{-1}$.

Для кращої наочності результати розрахунків представлено як у графічному вигляді, так і в табличному.

Порівняльний аналіз впливу режиму навантаження на працездатність шатунних підшипників. Графічні залежності, що демонструють зміну мінімальної товщини змащувального шару для мотилевого та головного підшипників, наведено на рис. 6 та 7.

Максимальні та середні значення розрахованих показників для мотилевого та головного підшипників наведено в табл. 1 та табл. 2 відповідно. Для першого варіанту дослідження встановлено характеристики робочих параметрів досліджуваних підшипників при роботі дизеля на найбільш вживаному режимі навантаження 75 % $N_{ен}$ та перевантажувальному режимі 110 %

$N_{ен}$ при значенні складальних радіальних зазорів 0,075 мм та 0,145 мм для головного та мотилевого підшипників відповідно. Отримані результати комп'ютерного моделювання протікання робочих процесів у досліджуваних підшипниках вказують на наявність стійкого режиму гідродинамічного мащення при всіх варіантах навантажень та робочих зазорів. При найбільш несприятливих умовах експлуатації дані підшипники будуть експлуатуватись при величині мінімальної товщини змащувального шару 10,2 мкм. Дане значення є граничним для даного типу підшипників [18] та відповідно є обґрунтованим. Максимальне значення тиску змащувального шару становить 226,4 МПа, що не перевищує межу міцності для алюмінієвих підшипникових матеріалів.

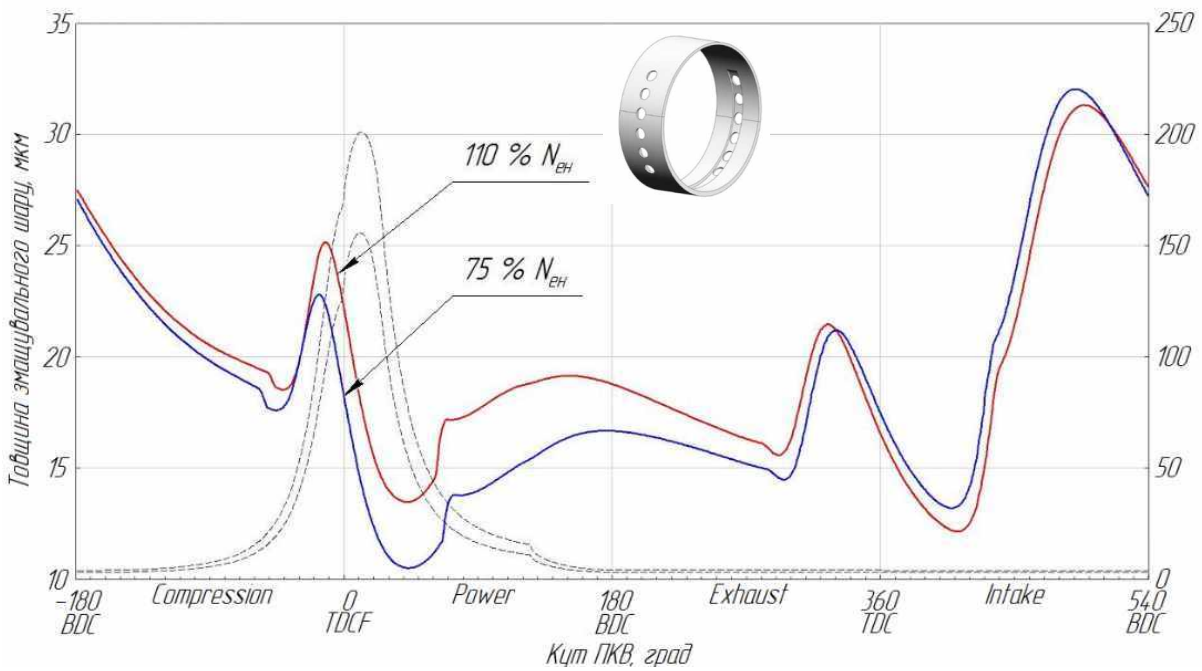


Рисунок 6 – Залежність мінімальної товщини змащувального шару в мотилевих підшипниках від кута повороту колінчастого валу

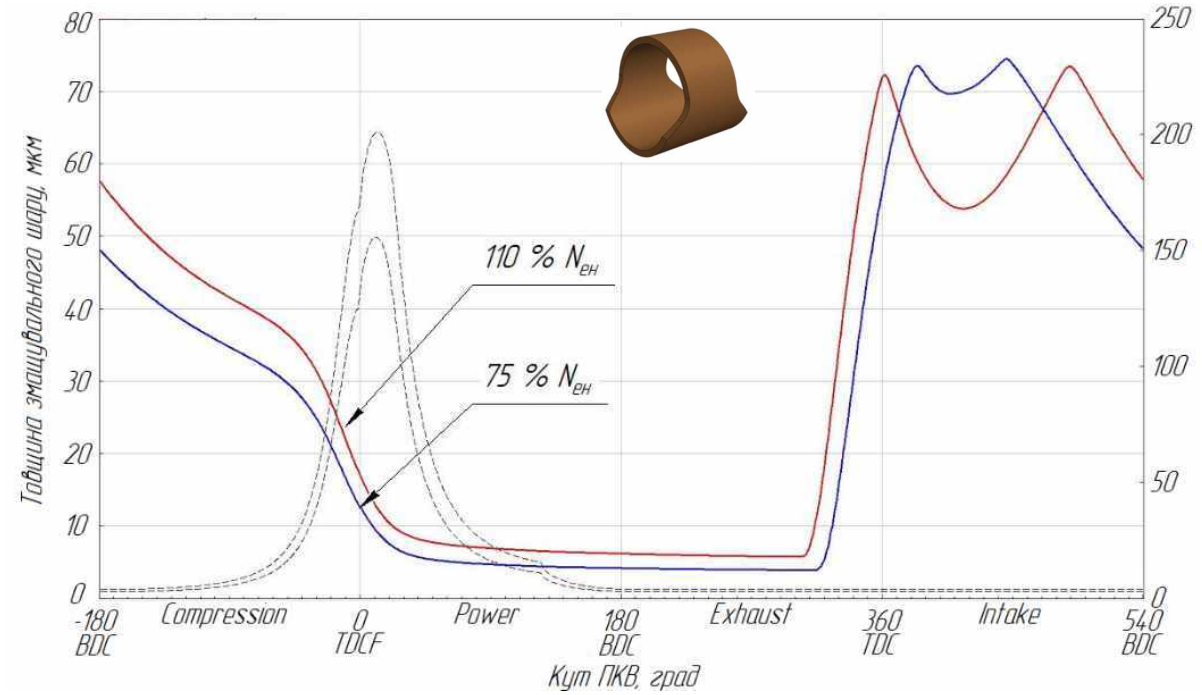


Рисунок 7 – Залежність мінімальної товщини змащувального шару в головних підшипниках від кута повороту колінчастого валу

Таблиця 1 – Результати розрахунку робочих параметрів мотилевого підшипника

Показник	Діапазон	Режим роботи 75 %		Режим роботи 110 %	
		Радіальний зазор, мм		Радіальний зазор, мм	
		0,145	0,175	0,145	0,175
Сила, що діє на підшипник у вертикальній площині, кН	макс	688,43		905,44	
	середнє	86,43		116,56	
Сила, що діє на підшипник у горизон-тальній площині, кН	макс	48,65		57,34	
	середнє	1,66		2,34	
Питомий тиск на підшипник, бар	макс	305,6		402,0	
	середнє	51,19		63,4	
Мінімальна товщина змащувального шару, мкм	мін	12,1	13,11	10,5	10,2
	середнє	19,8	23,1	18,7	21,7
Максимальний тиск змащувального шару, бар	макс	1223,0	1484,8	1788,4	2264,4
	середнє	203,2	237,7	265,5	316,5
Температура оливи в підшипнику, °С	макс	-	-	-	-
	середнє	56,5	49,6	56,5	49,85
Витрата оливи, л/хв	макс	34,4	172,0	39,0	150,8
	середнє	6,6	18,3	6,6	19,9

Таблиця 2 – Результати розрахунку робочих параметрів головного підшипника

Показник	Діапазон	Режим роботи 75 %		Режим роботи 110 %	
		Радіальний зазор, мм		Радіальний зазор, мм	
		0,075	0,145	0,075	0,145
Сила, що діє на підшипник у вертикальній площині, кН	макс	-733,75		-956,10	
	середнє	-85,47		-115,71	
Сила, що діє на підшипник у горизон-тальній площині, кН	макс	-29,87		-41,62	
	середнє	-1,64		-2,34	
Питомий тиск на підшипник, бар	макс	540,9		704,8	
	середнє	66,5		87,5	
Мінімальна товщина змащувального шару, мкм	мін	5,8	1,9	3,9	1,2
	середнє	31,6	35,2	28,4	34,3
Максимальний тиск змащувального шару, бар	макс	1787,9	3231,0	2653,5	5071,0
	середнє	210,1	373,4	314,3	589,8
Температура оливи в підшипнику, °С	макс	-	-	-	-
	середнє	47,95	47,1	48,32	47,13
Витрата оливи, л/хв	макс	4,65	30,0	4,46	43,52
	середнє	0,64	3,38	0,67	3,44

Інші результати робочих параметрів демонструють головні підшипники. Мінімальна товщини змащувального шару змінює своє значення від 5,8 мкм, при режимі роботи 75 % $N_{ен}$ та складальному значенні радіального зазору 0,075 мм до 1,2 мкм при несприятливих умовах

роботи – 110 % $N_{ен}$ та граничному значенні радіального зазору 0,145 мм. Граничний режим мащення має місце на тривалій ділянці відносно кута повороту колінчастого валу (рис. 7), що наближено становить 300 º – від початку робочого ходу та майже до кінця такту випуску. Режим граничного мащення в даному підшипнику зумовлений високим навантаженнями та малою швидкістю ковзання із зміною напрямку обертання при кожному оберті колінчастого валу. Збільшення робочого зазору також сприяє росту максимального тиску в змащувальному шару на 45 % (режим 75 % $N_{ен}$) та 48 % (режим 110 % $N_{ен}$). Максимальне значення тиску змащувального шару складає 507 МПа, що вказує на можливе перевантаження матеріалу підшипникового вузла.

Температура оливи в підшипниках змінюється незначно при зміні режиму навантаження, що може свідчити про стабільні умови терморегулювання. Витрата оливи збільшується при збільшенні експлуатаційних зазорів для обох типів підшипників, що потребує ретельного контролю за функціонуванням системи змащування.

Висновки. Приведено послідовність моделювання робочих параметрів підшипників шатуна із застосуванням програмного комплексу GT-Suite.

Результати комп'ютерного моделювання робочих процесів в головному та мотилевому підшипниках дизеля Hundai HiMSEN H25/33, при умовах роботи із номінальними та граничними зазорами та при навантаженні двигуна 75 % та 110 % $N_{ен}$ вказують на те, що

– зміна параметрів протікання робочого процесу в циліндрах двигунів не призведе до порушення режиму мащення мотилевих підшипників, що є одними із найбільш навантаженими вузлами КШМ;

– мінімальна товщина змащувального шару при роботі на перевантажувальному режимі із граничним значенням експлуатаційного зазору 0,175 мм становить 10,2 мм, що є допустимим для даного типу підшипників;

– мінімальна товщина змащувального шару в головному підшипнику на досліджуваних режимах змінюється в діапазоні від 5,8 до 1,2 мкм, що вказує на граничний режим мащення, що має місце на такті робочого ходу та більшій частині такту випуску;

– максимальний тиск в змащувальному шару головного підшипника може становити 226,4 МПа, що потребує додаткової оцінки стійкості до утворення втомних пошкоджень;

– температура оливи на виході з мотилевого підшипника, що має більший експлуатаційний зазор, має менші значення в порівнянні із підшипником, що має номінальне значення експлуатаційного зазору, в середньому на 6,8 ℃ через суттєве підвищення витрати моторної оливи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Liashuk O., Hupka A., Livitskyi O. Parameters of the lubrication process during operational wear of the crankshaft bearings of automobile engines. *Problems of Tribology*. 2022. 27(4/106). 69–81. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-69-81.

2. Bonneau Dominique, Fatu Aurelian, Souchet Dominique. (2014). Mixed Lubrication in Hydrodynamic Bearings. Mixed Lubrication in Hydrodynamic Bearings. 2014. 1-184. https://doi.org/10.1002/9781119004905.ch1.

3. Sun J., Li B., Zhu S., Miao E., Wang H., Zhao X., & Teng Q. Lubrication Performance of Connecting-Rod and Main Bearing in Different Engine Operating Conditions. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019. 32(1). doi:10.1186/s10033-019-0335-9.

4. Francisco A., Lavie T., Fatu A., et al. Metamodel-assisted optimization of connecting rod big-end bearings. *Journal of Tribology*. 2013, 135. 0417041- 04170410.

5. Lavie T., Fransisco A., Fatu A., et al. Multiobjective optimization of conrod big-end bearing lubrication using an evolutionary algorithm. *Tribology Transactions*. 2015. 58. 490-499.

6. Zhang J.H., Zhang G.C., He Z.P. et al. Optimization of crankshaft-bearing lubricating characteristics based on orthogonal experiment and neural network. *Transactions of CSICE*. 2011. 29(5). 461-467.

7. Ozasa T., Maitani K., Fujimoto Y. et al. Simplified estimation method of bearing friction for engines. *International J. of Engine Research*. 2016. 17(8). 886-896.

8. Bukovnik N., Dörr V., Čaika V., Bartz W.J., Loibnegger B. Analysis of diverse simulation models for combustion engine journal bearings and the influence of oil condition. *Tribol Int.* 2006. 39(8). 820-826.

9. Wu Q.L., Duan S.L., Wu Z.H., Xing H. Lubrication study on a connecting rod big end bearing of two-stroke marine diesel engine. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, China. 2010. 184-188.

10. Dhande D.Y., Pande D.W. Multiphase flow analysis of hydrodynamic journal bearing using CFD coupled Fluid Structure Interaction considering cavitation. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. 30. 345-354.

11. Zhao X., Huang A., Hu Z. Analysis of main bearing lubrication performance of high-power marine diesel engine under typical operating conditions. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*. 2015. 36(5). 128-133. https://doi.org/10.13949/j.cnki.nrjgc.2015.05.022.

12. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Акімов О.В. Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малообертового суднового дизельного двигуна Wartsila RT-Flex82C. *Розвиток транспорту*. 2021. 1(8). 91-102. https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09.

13. Савчук В.П., Білоусов Є.В., Зінченко Д.О., Бойко М.О.. Система моніторингу шатунних підшипників колінчастих валів суднових двигунів внутрішнього згоряння. *Розвиток транспорту*. 2022. 1(12). 64-74. https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06.

14. Бойко М.О., Савчук В.П., Зінченко Д.О. Визначення впливу порушення протікання робочого процесу суднового двигуна MAN B&W 8L48/60 на динамічні показники кривошипно-шатунного механізму. *Розвиток транспорту*. 2023. 1(16). 34-46. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.03.

15. Martin F.A. Oil flow in plain steadily loaded journal bearings: Realistic predictions using rapid techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* 1998. 212(6). 413-425. https://doi.org/10.1243/1350650981542227.

16. Gamma Technologies (2010): Gamma Technologies - Engine and Vehicle simulation, [online]. Available at: http://www.gtisoft.com [Accessed 10th October 2021].

17. Kunt M.A., Calam A., Gunes H. Analysis of the effects of lubricating oil viscosity and engine speed on piston-cylinder liner frictions in a single cylinder HCCI engine by GT-SUITE program. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023. 237(2). 399-409. https://doi.org/10.1177/09544089221132988.

18. HYUNDAI Heavy Industries Co., Ltd. HYUNDAI - HiMSEN H25/33 Instruction Book. HYUNDAI Heavy Industries Co., Ltd.: Ulsan, Republic of Korea, 2019. 581.

REFERENCES

1. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Liashuk, O., Hupka, A., & Livitskyi, O. (2022). Parameters of the lubrication process during operational wear of the crankshaft bearings of automobile engines. *Problems of Tribology*, vol. 27, № 4/106, 69–81. Retrieved from: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-69-81. [in English].

2. Dominique Bonneau, Aurelian Fatu, Dominique Souchet. (2014). Mixed Lubrication in Hydrodynamic Bearings. Mixed Lubrication in Hydrodynamic Bearings. 1-184. Retrieved from: https://doi.org/10.1002/9781119004905.ch1. [in English].

3. Sun, J., Li, B., Zhu, S., Miao, E., Wang, H., Zhao, X., & Teng, Q. (2019). Lubrication Performance of Connecting-Rod and Main Bearing in Different Engine Operating Conditions. *Chinese*

Journal of Mechanical Engineering, vol. 32, iss. 1. Retrieved from: https://doi.org/10.1186/s10033-019-0335-9. [in English].

4. Francisco, A., Lavie, T., Fatu, A., et al. (2013). Metamodel-assisted optimization of connecting rod big-end bearings. *Journal of Tribology*, vol. 135, 0417041- 04170410. Retrieved from: https://doi.org/10.1115/1.4024555 [in English].

5. Lavie, T., Fransisco, A., Fatu, A., et al. (2015). Multiobjective optimization of conrod big-end bearing lubrication using an evolutionary algorithm. *Tribology Transactions*, vol. 58, 490-499. Retrieved from: https://doi.org/10.1080/10402004.2014.939795 [in English].

6. Zhang, J.H., Zhang, G.C., He, Z.P., et al. (2011). Optimization of crankshaft-bearing lubricating characteristics based on orthogonal experiment and neural network. *Transactions of CSICE*, vol. 29, iss. 5, 461-467. Retrieved from: doi:10.1088/1742-6596/1601/6/062051 [in English].

7. Ozasa, T., Maitani, K., Fujimoto, Y., et al. (2016). Simplified estimation method of bearing friction for engines. *International Journal of Engine Research*, vol. 17, iss. 8, 886-896. Retrieved from: https://doi.org/10.1177/1468087415622885 [in English].

8. Bukovnik, N., Dörr, V., Čaika, V., Bartz, W.J., Loibnegger, B. (2006). Analysis of diverse simulation models for combustion engine journal bearings and the influence of oil condition. *Tribology International*, vol. 39, iss. 8, 820-826. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.023 [in English].

9. Wu, Q.L., Duan, S.L., Wu, Z.H., Xing, H. (2010). Lubrication study on a connecting rod big end bearing of two-stroke marine diesel engine. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, China, 184-188. Retrieved from: DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5622574 [in English].

10. Dhande, D.Y., Pande, D.W. (2018). Multiphase flow analysis of hydrodynamic journal bearing using CFD coupled Fluid Structure Interaction considering cavitation. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 30, 345-354. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.09.001. [in English].

11. Zhao, X., Huang, A., Hu, Z. (2015). Analysis of main bearing lubrication performance of high-power marine diesel engine under typical operating conditions. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, vol. 36, iss. 5, 128-133. Retrieved from: https://doi.org/10.13949/j.cnki.nrjgc.2015.05.022. [in English].

12. Savchuk, V.P., Zinchenko, D.O., Akimov, O.V. (2021). Modeling of the working parameters of crankshaft bearings of the low-speed marine diesel engine Wartsila RT-Flex82C [Modeliuvannia robochykh parametriv motylevykh pidshypnykiv maloobertovoho sudnovoho dyzelnoho dvyhuna Wartsila RT-Flex82C]. *Transport Development*, vol. 1(8), 91-102. Retrieved from: https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09 [in Ukrainian].

13. Savchuk, V.P., Bilousov, E.V., Zinchenko, D.O., Boyko, M.O. (2022). Monitoring system of connecting rod bearings of crankshafts of internal combustion marine engines [Systema monitorynhu shatunnykh pidshypnykiv kolinchastykh valiv sudnovykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia]. *Transport Development*, vol. 1(12), 64-74. Retrieved from: https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06 [in Ukrainian].

14. Boyko, M.O., Savchuk, V.P., Zinchenko, D.O. (2023). Determination of the influence of violation of the flow of the working process of the MAN B&W 8L48/60 marine engine on the dynamic indicators of the crank-connecting rod mechanism [Vyznachennia vplyvu porushennia protikannia robochoho protsesu sudnovoho dvyhuna MAN B&W 8L48/60 na dynamichni pokaznyky kryvoshypno-shatunnoho mekhanizmu]. *Transport Development*, vol. 1(16), 34-46. Retrieved from: https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.03 [in Ukrainian].

15. Martin F.A. (1998). Oil flow in plain steadily loaded journal bearings: Realistic predictions using rapid techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 212, iss. 6, 413-425. Retrieved from: https://doi.org/10.1243/1350650981542227. [in English].

16. Gamma Technologies (2010): Gamma Technologies - Engine and Vehicle simulation, [online]. Available at: http://www.gtisoft.com [Accessed 10th October 2021]. [in English].

17. Kunt, M.A., Calam, A., Gunes, H. (2023). Analysis of the effects of lubricating oil viscosity and engine speed on piston-cylinder liner frictions in a single cylinder HCCI engine by GT-SUITE program. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 237, iss. 2, 399-409. Retrieved from: https://doi.org/10.1177/09544089221132988. [in English].

18. HYUNDAI Heavy Industries Co., Ltd. (2019). HYUNDAI - HiMSEN H25/33 Instruction Book. HYUNDAI Heavy Industries Co., Ltd.: Ulsan, Republic of Korea, 581. [in English and Korean].

Savchuk V.P., Zinchenko D.O., Kochetov H.A., Dzygar A.K.

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF CONNECTING ROD BEARINGS IN THE MEDIUM-SPEED ENGINE HIMSEN H25/33 DURING OPERATION WITH PERMISSIBLE CLEARANCES WITHOUT REPAIR

This article is devoted to determining the influence of loading conditions and working clearances on the performance of main and backup bearings on the example of a medium-speed marine diesel engine Hyundai HiMSEN H25/33. Another important aspect of this study is the analysis of the safety of the studied bearings at the assembly and limit values of working clearances. The sequence of modeling of work processes in connecting rod bearings using the specialized software package GT-Suite is presented. The characteristics of the operating parameters of the studied bearings during diesel engine operation at the most commonly used load mode of 75 % N_e and overload mode of 110 % N_e at assembly and allowable working clearances without repair were determined. The obtained results of computer modeling of the working processes in the motive power bearings indicate the presence of a stable hydrodynamic lubrication regime at all loadings and working clearances. It has been established that under the most unfavorable operating conditions, the minimum thickness of the lubricating layer is 10.2 microns. This value is the limit for this type of bearing and is therefore reasonable. The maximum value of the lubricating layer pressure is 226.4 MPa, which does not exceed the tensile strength for aluminum bearing materials. In the main bearings, the boundary lubrication regime occurs over a long area relative to the crankshaft rotation angle, which is approximately 300° - from the beginning of the stroke to almost the end of the release stroke. The boundary lubrication mode in this bearing is caused by high loads and low sliding speed with a change in the direction of rotation with each revolution of the crankshaft. The increase in the working clearance also contributes to an increase in the maximum pressure in the lubricating layer by 45% (75% N_e mode) and 48% (110% N_e mode). The maximum value of the lubricating layer pressure is 507 MPa, which indicates a possible overload of the bearing assembly material.

Keywords: *working clearance, allowable clearance without repair, modeling, bearing, crankshaft, lubrication.*

УДК 629.132.17.001.5 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.14

Савчук В.П., Курносенко Д.В., Білоусов Є.В. Сатулов А.І.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПОВИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМ ЗМАЩУВАННЯ ВИСОКООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Ефективним напрямком підвищення безвідмовності, та вцілому й надійності підшипникових вузлів кривошипно-шатунного механізму (КШМ) є розробка нових та вдосконалення існуючих методів діагностування їх працездатності та працездатності систем змащування (СЗ) без виведення двигунів з дії. Особливо це актуально для головних суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), що функціонують в умовах тривалої безперервної дії на різних режимах навантаження. На практиці застосовуються непрямі методи оцінки працездатності підшипників КШМ шляхом моніторингу показників функціональних параметрів: температури оливи на вході та виході з підшипників, концентрації парів оливи в картері дизеля та ін. Додатково працездатність СЗ оцінюється моніторингом тиску оливи на вході в двигун, та виконується періодичний контроль її в'язкості, що є основним показником, який забезпечує працездатність підшипників ковзання. При пошуку алгоритмів діагностування СЗ виділено два контури діагностування: контур подачі, очищення та охолодження моторної оливи й контур змащування підшипникових вузлів та охолодження поршнів. Перед проведенням аналізу кореляційних зв'язків між діагностичними параметрами виділено основні несправності: забруднення сітки оливоприймача, знос деталей насосу оливи, заклинювання золотника запобіжного клапану, інтенсивне забруднення фільтра оливи, відхилення в'язкості моторної оливи від встановленого діапазону заводом-виробником. Для визначення характеристик елементів СЗ проведено ряд експериментальних стендових досліджень при різних умовах її функціонування: при відсутності відхилень робочих параметрів від нормативних; при підвищеній витраті моторної оливи через головну оливну магістраль; при підвищеному значенні опору на лінії всмоктування моторної оливи; при підвищеному значенні опору фільтру оливи (експлуатація дизеля із фільтром оливи, що має значне забруднення фільтруючого елементу); при фіксованому відкритому положенні золотника запобіжного клапану. Наведені результати вказують на недостатність існуючих засобів діагностування працездатності елементів СЗ, а також відсутність можливостей забезпечення необхідної повноти діагностування навіть при можливості додаткового вимірювання тиску безпосередньо в контурі системи подачі, очищення та охолодження моторної оливи. Внаслідок впливу запобіжного клапану на показники тиску як в контурі, так і в напірній магістралі, компенсувати відсутність діагностичної інформації можливо шляхом визначення витрати моторної оливи через запобіжний клапан.

Ключові слова: *високообертовий двигун внутрішнього згоряння, система змащування, фільтр оливи, насос оливи, запобіжний клапан*

Постановка проблеми. Оскільки існують відомі труднощі моніторингу структурних параметрів КШМ ДВЗ, що напряму вказують на зміну технічного стану об'єкту діагностування, таких як величина робочого зазору, товщина змащувальної плівки підшипників КШМ, то на практиці часто застосовують непрямі методи оцінки їх працездатності шляхом моніторингу показників функціональних параметрів [1, 2, 3]. Зазвичай такими є температура оливи на вході та виході з підшипників, концентрація парів оливи в картері дизеля та ін. Оцінювання працездатності систем змащування (СЗ) виконують шляхом моніторингу тиску оливи на вході в

двигун та періодичним контролем її в'язкості, якає одним із основних параметрів, що забезпечує працездатність підшипників ковзання. Зазвичай високообертові ДВЗ, що мають систему змащування із «мокрим» картером, мають обмежені можливості визначення динаміки зміни технічного стану елементів СЗ, оскільки безперервно можуть контролюватись тільки значення температури та тиску моторної оливи в центральній оливній магістралі, які дають можливість оцінити працездатність системи вцілому або констатувати існуючу відмову її критичних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існуючі системи функціонального та тестового діагностування систем змащування високообертових ДВЗ все ще не мають узагальнених критеріїв обробки діагностичних параметрів з метою визначення несправностей в умовах експлуатації. Такі системи діагностування отримали обмежене застосування на практиці. Частково дослідження із даної тематики опубліковано колективами авторів [3, 4].

Формулювання цілей статті. Попередити пошкодження підшипників колінчастого валу через порушення функціонування елементів СЗ чи зміни властивостей моторної оливи можливо шляхом оснащення двигунів системами безперервного моніторингу за робочими характеристиками СЗ та її діагностування. Метою даного дослідження є встановлення кореляційних зв'язків між структурними та функціональними параметрами СЗ високообертових ДВЗ та аналіз достатності використання бортового діагностичного обладнання для моніторингу функціонування СЗ та діагностування найбільш розповсюджених варіантів порушення їх працездатності.

Основні результати дослідження. При пошуку алгоритмів діагностування СЗ доцільним є виділити два її контури, що діагностуються:

– контур подачі, очищення та охолодження моторної оливи;

– контур змащування підшипникових вузлів та охолодження поршнів.

Такий поділ дасть можливість чітко виділити діагностичні ознаки за об'єктами СЗ та встановити між ними кореляційні зв'язки. Показниками, що можуть використовуються для визначення зміни технічного стану елементів СЗ та відхилення в'язкості моторної оливи від допустимих заводом виробником, є тиск, витрата та температура моторної оливи. Також необхідно враховувати особливості компонування СЗ та конструктивні особливості її елементів та вузлів.

Перед проведенням аналізу кореляційних зв'язків між вказаними діагностичними параметрами попередньо виділимо основні несправності, що можливо діагностувати непрямими методами:

– забруднення сітки оливоприймача;

– знос деталей насосу оливи;

– заклинювання золотника запобіжного клапану;

– інтенсивне забруднення фільтра оливи;

– відхилення в'язкості моторної оливи від встановленого діапазону заводом-виробником.

Наведені несправності не враховують зміни технічного стану підшипникових вузлів, хоча не виключають можливості їх узагальненого діагностування. Дане питання потребує проведення окремих досліджень, зокрема в напрямку визначення впливу зносу підшипникових вузлів на характер пульсацій тиску моторної оливи [9, 10].

Для пошуку закономірностей впливу зміни технічного стану елементів СЗ, що наведено вище, можна застосовувати методи математичного моделювання, стендові дослідження та натурні випробування. Кожен із даних методів не виключає один одного, а лише доповнює, мають за мету покращити розуміння процесів, які відбуваються в системах, вдосконалення математичних моделей, спрощення розробки, виробництва та введення в експлуатацію виробу та, взагалі, підвищення його рівня надійності та енергоефективності.

Для визначення характеристик елементів СЗ з урахуванням різних технічних станів її складових елементів, нами розроблено дослідний стенд [11, 12]. В якості стендового насосу

оливи нами використовувався насос моделі 50-1403010-Б1 високообертового дизельного двигуна Д246.4 [13] та відповідний йому корпус фільтру оливи із запобіжним клапаном 245-1017015-Б (рис. 1). В якості стендового фільтру оливи використовувався фільтр SM108 із диференційним тиском відкриття перепускного клапану 0,25 МПа та тиском відкриття антидренажного клапану 0,1 МПа. При дослідженні впливу забрудненого фільтру оливи на показники СЗ використовувався фільтр М-019 із аналогічними характеристиками клапанів.

Граничними умовами при проведенні стендових випробувань були наступні:

– індекс в'язкості моторної оливи SAE 10W40 (кінематична в'язкість 15 сСт при температурі 100 °С);

– температура моторної оливи на виході із насосу 85 °С;

– досліджувані режими роботи насосу оливи при 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 та 2750 $хв^{-1}$.

Проведено п'ять різних варіантів досліджень умов функціонування СЗ, що характеризують варіанти зміни чи втрати працездатності її складових елементів. Кожен варіант було повторено щонайменше 4 рази. Відхилення отриманих результатів від середнього значення не перевищувало 2,0 %.

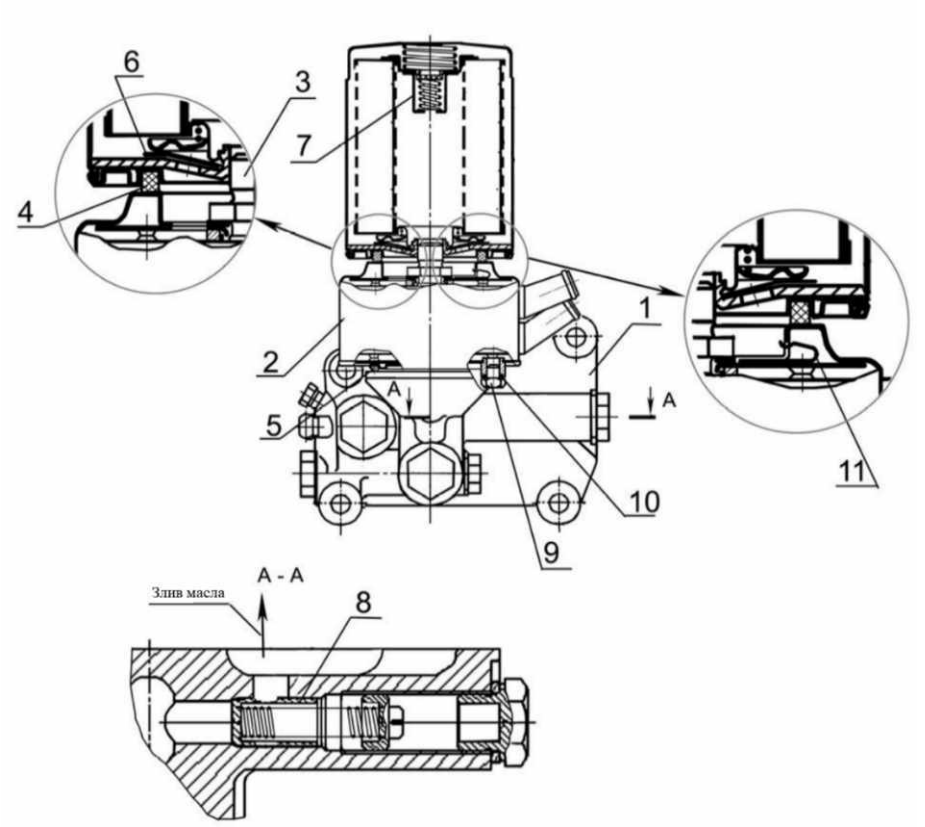


Рисунок 1 – Клапани системи змащування високообертового двигуна Д246.4:
1 – корпус фільтра оливи; 2 – рідинно-оливний теплообмінник; 3 – штуцер; 4 – прокладка фільтра; 5 – прокладка рідинно-оливного теплообмінника; 6 – клапан протидренажний; 7 – клапан перепускний; 8 – клапан запобіжний; 9 – пробка для зливу охолоджувальної рідини; 10 – кільце ущільнювальне; 11 – запобіжний клапан рідинно-оливного теплообмінника

Варіант 1. Дослідження характеристик СЗ, що не має відхилень експлуатаційних показників від нормативних.

Варіант 2. Дослідження характеристик СЗ при підвищеній витраті моторної оливи через головну оливну магістраль. Здійснювалось шляхом збільшення площі прохідного перерізу стендового дроселю в напірній лінії.

Варіант 3 (3а). Дослідження характеристик СЗ при підвищеному значенні опору на лінії всмоктування моторної оливи. Здійснювалось шляхом зменшення площі прохідного перерізу стендового дроселю на лінії всмоктування.

Варіант 4. Виконувалось дослідження характеристик СЗ при підвищеному значенні опору фільтру оливи (експлуатація дизеля із фільтром оливи, що має значне забруднення фільтруючого елементу).

Варіант 5. Виконувалось дослідження характеристик СЗ при фіксованому відкритому положенні золотника запобіжного клапану.

Результати осереднених значень наведено у вигляді графічних залежностей (рис. 2-13).

В якості основних характеристик СЗ наведено залежності витрат моторної оливи в напірну лінію (через фільтр оливи), витрата моторної оливи через запобіжний клапан та сумарна продуктивність насосу оливи. Також при кожному варіанті, що відтворено при стендових дослідженнях, реєструвались параметри тиску в напірній лінії, тиску, що створюється насосом оливи, значення перепаду тиску на фільтрі оливи та значення абсолютного тиску на всмоктуванні перед насосом.

Відповідно, для першого варіанту дослідження, отримані результати представлено на рис. 2 і 3.

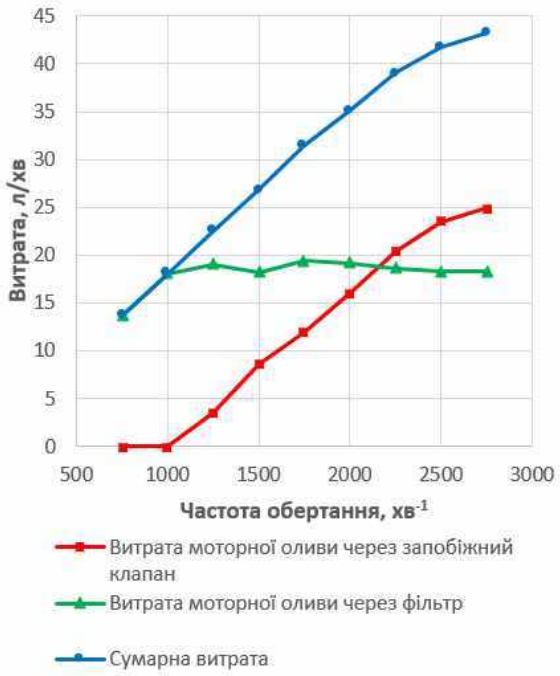


Рисунок 2 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу

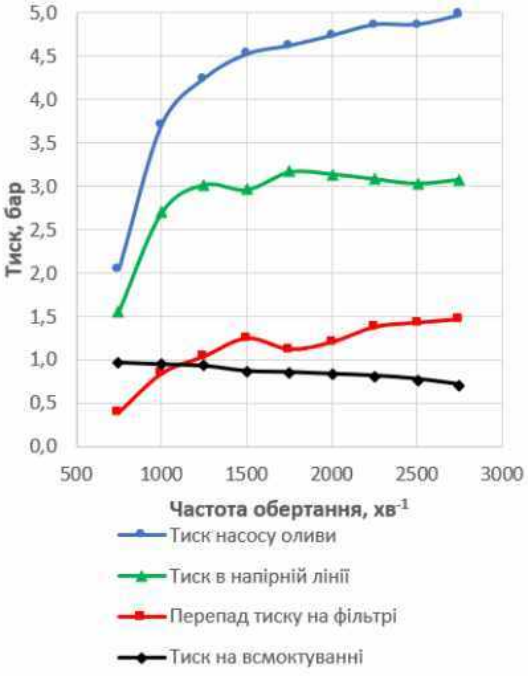


Рисунок 3 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

На даних режимах роботи СЗ в діапазоні частоти обертання насосу 1250…2750 хв$^{-1}$ підтримується тиск в напірній лінії близько 0,3 МПа (3 бар), що забезпечується налаштуваннями запобіжного клапану. Витратна характеристика даного клапану це

підтверджує (рис. 2). Витрата моторної оливи в діапазоні обертів 1000…2750 хв$^{-1}$ наближається до значення близько 20 л/хв. Залежність продуктивності насосу оливи демонструє лінійну залежність до значення частоти обертання насосу оливи 1750 хв$^{-1}$, а далі спостерігається поступове відхилення в сторону зменшення, що пояснюється збільшенням втрат в насосі через перетікання оливи в зазорах насосу та збільшення опору на всмоктуванні (рис. 3).

Для забезпечення працездатності СЗ при зміні характеристик її складових елементів та змащувальних вузлів (знос підшипників КШМ, знос деталей насосу оливи, зміна в'язкості моторної оливи, забруднення фільтруючого елементу фільтру оливи, тощо) продуктивність насосів оливи вибирається із майже двократним запасом. При експлуатації двигуна при відсутності суттєвих відхилень технічного стану елементів СЗ від нормативних значень, практично рівнозначна кількість моторної оливи перепускається запобіжними клапанами поза центральну магістраль системи та подається до неї. При зменшенні, наприклад, продуктивності насосу оливи, відповідно зменшується її кількість, що відводиться через запобіжний клапан. Зміна продуктивності насосу оливи також відбувається при зміні частоти обертання колінчастого валу дизелів, що працюють за швидкісною характеристикою.

Імітація зносу підшипникових вузлів КШМ (варіант 2) здійснювалась шляхом зменшення опору в напірній магістралі стендовим дроселем. Отримані характеристики витрати та тиску в контурі наведено на рис. 4 та 5. Аналіз отриманих результатів вказує на падіння тиску в напірній лінії в середньому на 0,1 МПа (1,0 бар) при підвищенні витрати в діапазоні 2,0…3,0 л/хв. Для підтримки базового значення тиску в системі функціонування запобіжного клапану є недостатнім, хоча й витрата через нього зменшилась (наприклад, при частоті обертання 2500 хв$^{-1}$ на 3,85 л/хв). За рахунок підвищення витрати в напірну магістраль підвищився опір на фільтрі оливи в середньому на 0,07 МПа. Значення опору на всмоктуванні практично не змінилось.

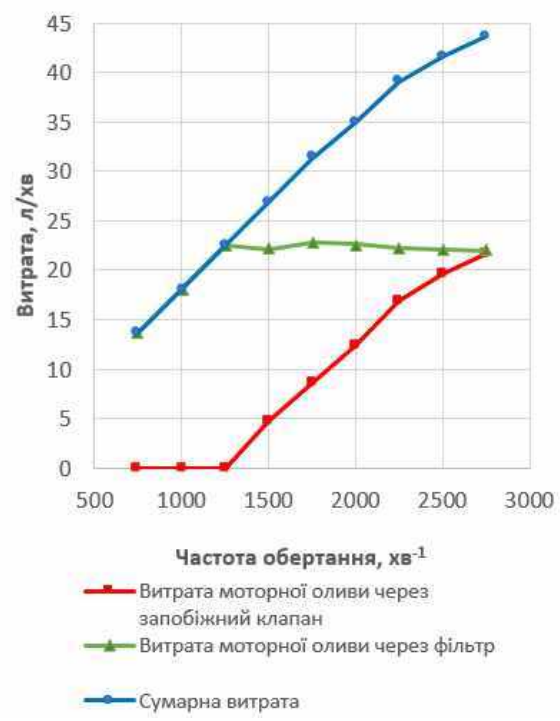


Рисунок 4 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу

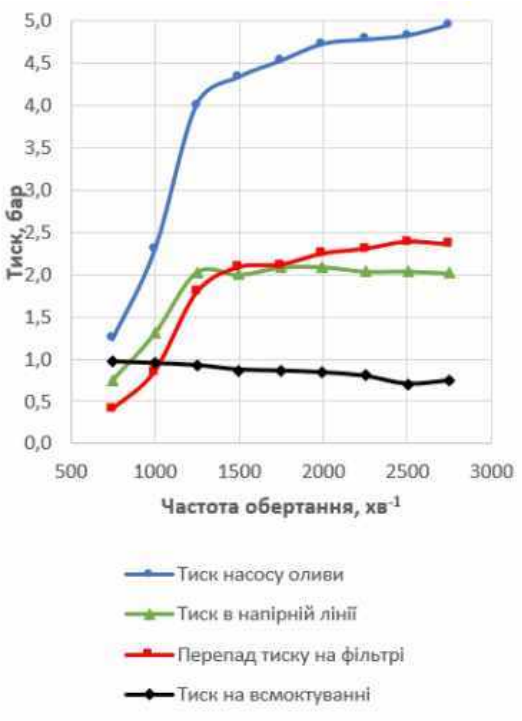


Рисунок 5 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

Результати для варіанту 3 (3а) наведено на рис. 6-9, що побудовані за аналогічним принципом, як і для попередніх варіантів. Зниження абсолютного значення тиску на всмоктуванні очікувано призводить до зменшення об'ємного ККД насосу оливи та призводить до зниження його продуктивності при значенні тиску на всмоктуванні менше 0,065 МПа (0,65 бар). При значенні цього параметру нижче 0,04 МПа було зареєстровано інтенсивне піноутворення внаслідок виділення парової фази із моторної оливи та відповідно порушення сталого режиму роботи насосу оливи. Втрати на всмоктуванні пов'язані із розрідженням у всмоктувальній камері насосу, що призводить до неповного заповнення міжзубових впадин та утворення кавітації [14].

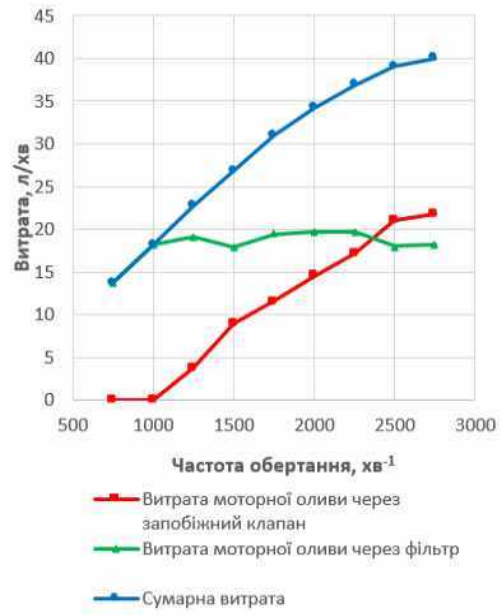


Рисунок 6 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу

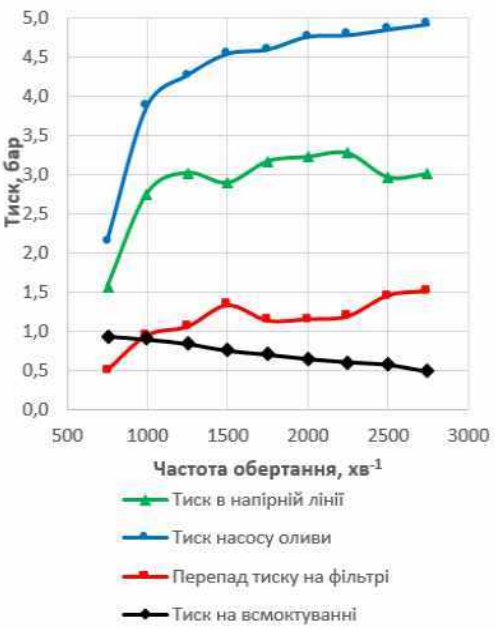


Рисунок 7 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

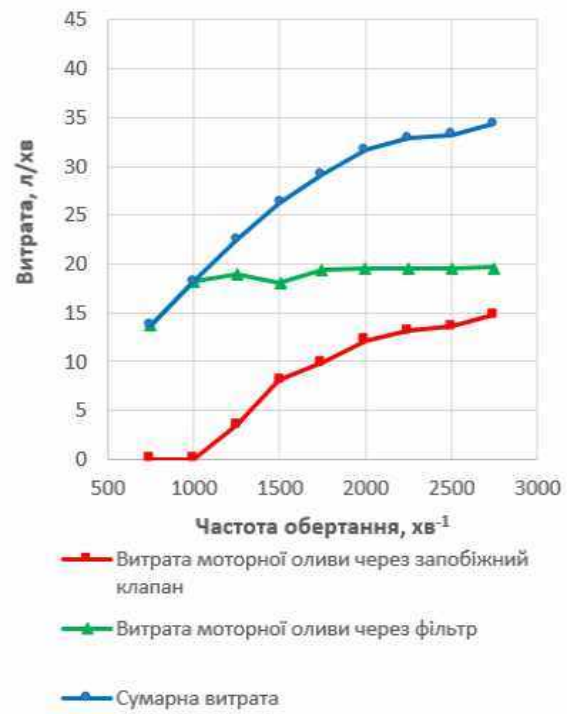


Рисунок 8 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу

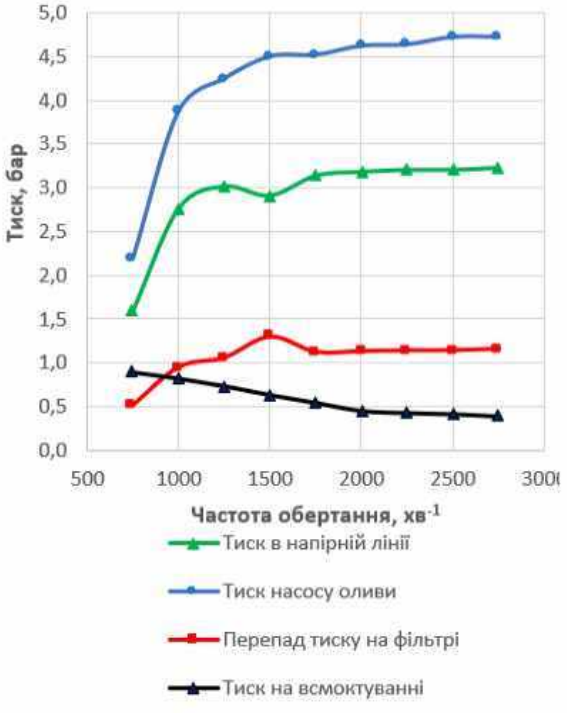


Рисунок 9 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

При даних налаштуваннях робота запобіжного клапану забезпечує нормативне значення тиску в напірній лінії СЗ в діапазоні 0,3 МПа (3 бар). Прогнозовано, що при несприятливих умовах, пов’язаних із зносом підшипникових вузлів (варіант 2) та забрудненням оливоприймача (варіант 3а), може виникнути падіння тиску в СЗ до критичного значення, що для даного типу дизелів становить 0,1 МПа при роботі на режимі холостого ходу та 0,25 МПа при режимі роботи при номінальній частоті обертання колінчастого валу.

Вплив забрудненого фільтру оливи на характеристики СЗ можна побачити на графічних залежностях, що наведено на рис. 10, 11. Витратна характеристика насосу вказує на появу зниження об’ємного ККД насосу в порівнянні із базовим варіантом (рис 2) та роботою запобіжного клапану при мінімальній частоті обертання (рис. 10). Відповідно, витрата моторної оливи через напірну магістраль не перевищує 11,57 л/хв, а тиск 0,14 МПа. Такі показники є неприпустимими для забезпечення працездатності підшипників КШМ двигуна на робочих режимах навантаження. Вимірювання диференційного тиску на фільтрі оливи (рис. 11) вказує на значення відкриття перепускного клапану після 0,31 МПа, хоча виробником фільтру заявлено величина 0,25 МПа (виробник дизеля встановлює допустимий діапазон спрацьовування перепускних клапанів фільтрів оливи 0,13…0,17 МПа [13]). В напірній лінії зареєстровано діапазон тиску від 0,09 до 0,014 МПа, що вказує на неприпустимий режим роботи СЗ та ймовірне пошкодження підшипників колінчастого валу при роботі на режимах робочих навантажень двигуна.

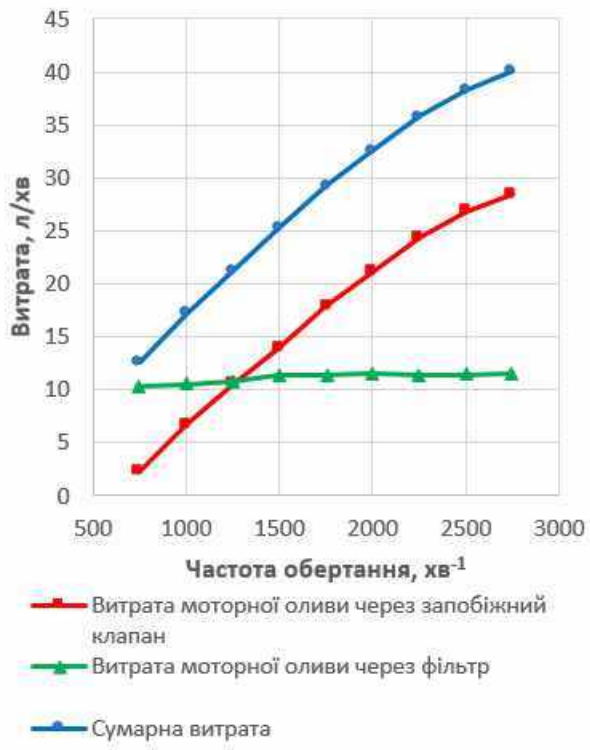


Рисунок 10 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу оливи

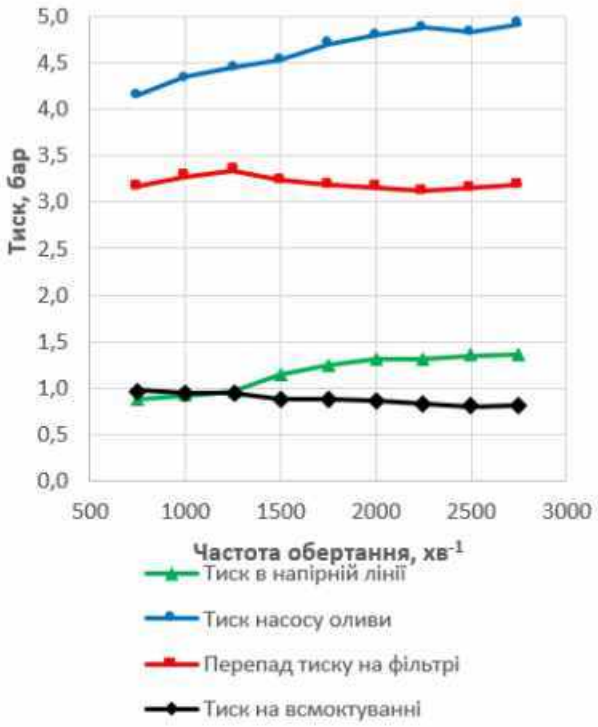


Рисунок 11 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

Прогнозовану динаміку зміни значень досліджуваних показників демонструє п’ятий варіант налаштувань роботи СЗ, а саме при фіксованому відкритому положенні золотника запобіжного клапану. Такі умови забезпечувались заміною пружини клапану на жорсткий стрижень, що імітує роботу клапану в положенні 8 мм від початкового положення. Результати графічних залежностей за даним варіантом наведено на рис. 12 та 13.

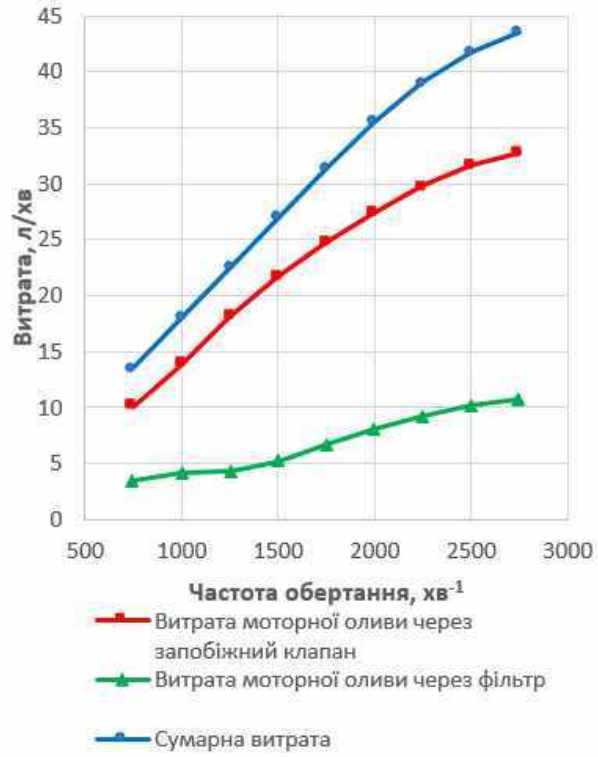


Рисунок 12 – Залежність витрати моторної оливи через запобіжний клапан та фільтр оливи від частоти обертання насосу

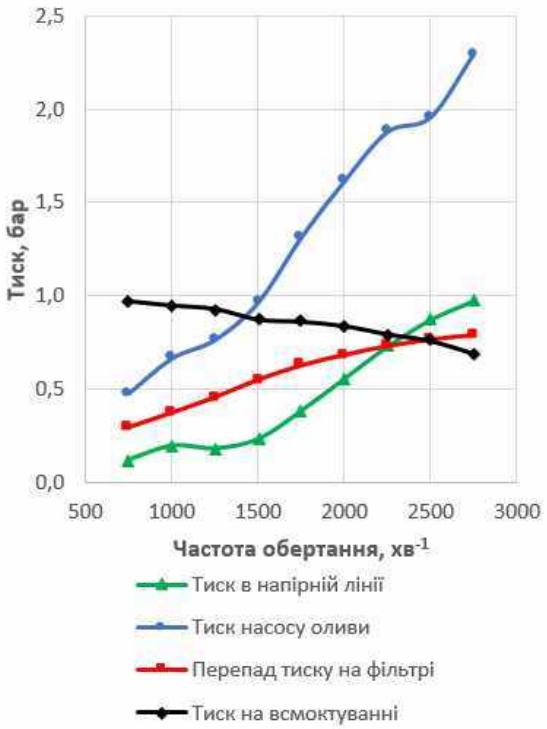


Рисунок 13 – Тиск моторної оливи після та на всмоктуванні насосу, в напірній лінії та перепад тиску на фільтрі при різних значеннях частоти обертання насосу

При встановлених умовах роботи СЗ спостерігається зниження витрати моторної оливи через фільтр до 10,74 л/хв навпроти 18,33 л/хв для базового варіанту при максимальних обертах насосу оливи. Значення тиску в напірній магістралі не перевищує 0,01 МПа.

Для визначення вимог до оснащення системи діагностування СЗ проведемо аналіз можливостей виявлення зміни її технічного стану за функціональними параметрами: значення тиску в напірній магістралі, в контурі подачі та очищення моторної оливи (перед запобіжним клапаном) та диференційний тиск на фільтрі оливи.

Графічні залежності зміни значень функціональних параметрів наведено на рис. 14-16. Попередній аналіз можливостей використання даного набору діагностичних параметрів для діагностування описаних несправностей СЗ дозволяє встановити наступне:

– вплив на величину диференційного тиску на фільтрі оливи мають витрата моторної оливи через фільтр та ступінь його забруднення;

– вплив на величину тиску в напірній магістралі СЗ мають технічний стан підшипників КШМ, витрата оливи через фільтр, ступінь забруднення фільтру оливи;

– головний вплив на величину тиску в контурі подачі та очищення моторної оливи СЗ здійснює технічний стан запобіжного клапану.

Зведена таблиця (табл. 1) демонструє зв’язки між функціональними та структурними параметрами СЗ та можливість їх використання для проведення моніторингу зміни технічного стану, так і причин втрати працездатності її складових елементів.

Наведені результати також вказують на складність діагностування збільшення опору на всмоктуванні насосу шляхом вимірювання тисків. Цей варіант відхилення технічного стану від нормативного реєструється шляхом визначення витрати моторної оливи через запобіжний клапан.

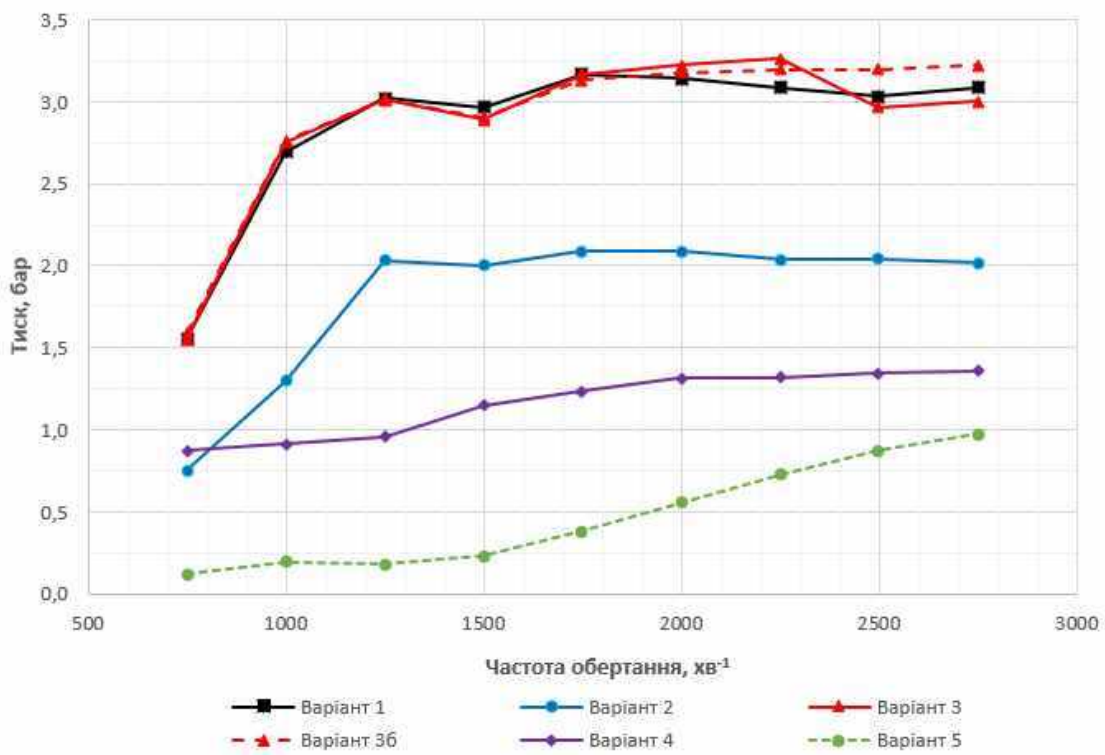


Рисунок 14 – Залежність тиску в напірній магістралі СЗ при різних варіантах технічного стану її елементів

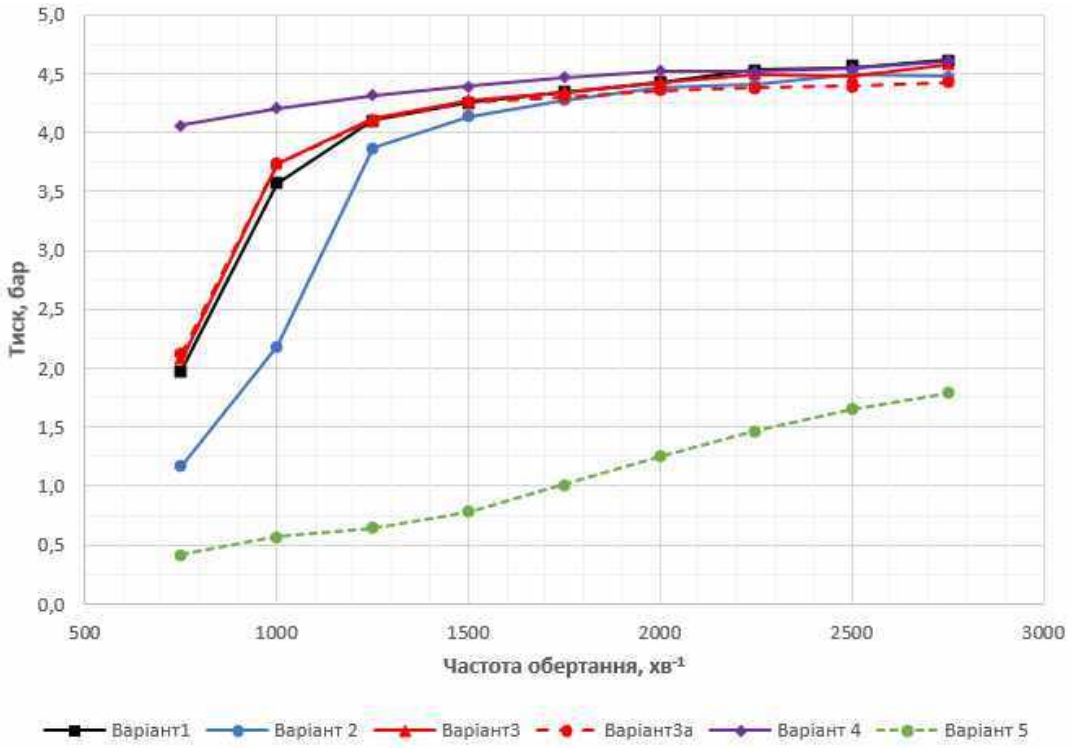


Рисунок 15 – Залежність тиску в контурі подачі та очищення моторної оливи СЗ при різних варіантах технічного стану її елементів

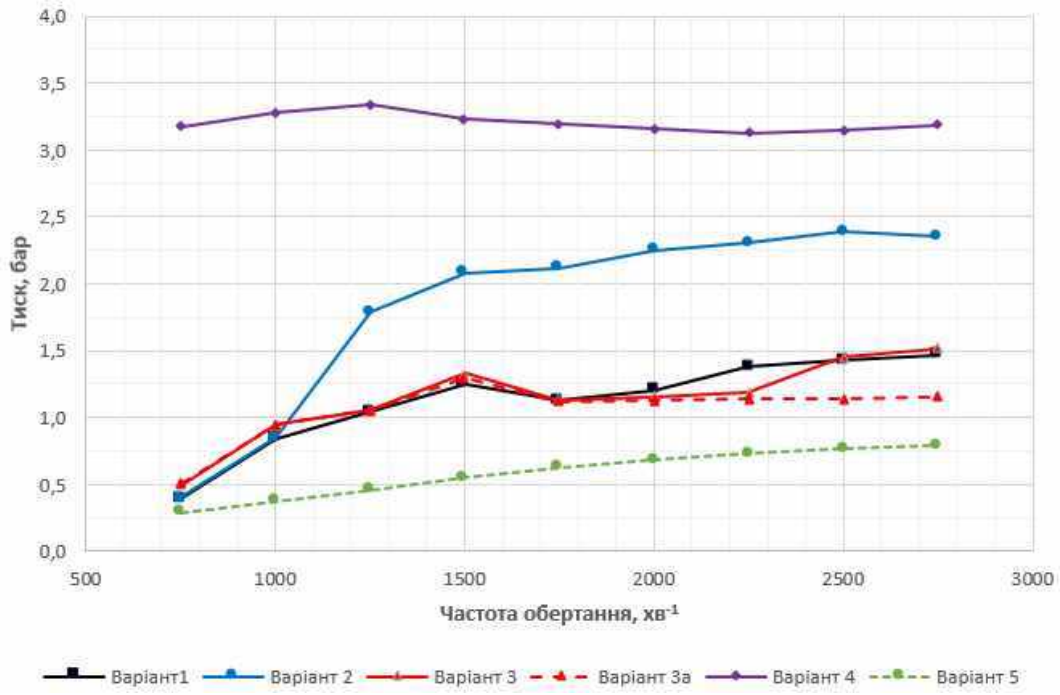


Рисунок 16 – Залежність перепаду тиску на фільтрі оливи при різних варіантах технічного стану її елементів

Таблиця 1 – Взаємозв'язок між функціональними та структурними параметрами СЗ

Варіант дослідження	Структурні параметри	Функціональні параметри		
		Тиск в напірній магістралі	Тиск в контурі подачі та очищення моторної оливи	Перепад тиску на фільтрі оливи
Варіант 2	Знос підшипникових вузлів КШМ	+	+/-	+/-
Варіант 3,3а	Забруднення оливоприймача	+/-	+/-	+/-
Варіант 4	Забруднення фільтру оливи	+	+/-	+/-
Варіант 5	Заклинювання золотника запобіжного клапану	+	+	+

Прим. Позначки + та +/- вказують на можливість використання функціонального параметру на всьому діапазоні частот обертання насосу моторної оливи чи тільки на його частині.

Також потребує вирішення питання встановлення причини збільшення падіння тиску на фільтрі оливи, що може відбуватись як через знос підшипникових вузлів КШМ, так і через безпосередньо забруднення фільтру оливи. Тому, для проведення більш детального діагностування працездатності елементів СЗ, необхідно застосовувати весь діапазон режимів

роботи двигуна (що не можливо реалізувати для дизелів, які працюють за навантажувальною характеристикою), чи забезпечити реєстрацію додаткового діагностичного параметру, яким є витрата моторної оливи через запобіжний клапан.

Висновки. В результаті проведеного аналізу результатів стендових експериментальних досліджень було встановлено залежність між функціональними та структурними параметрами системи змащування високообертового дизеля Д246.4 при різних варіантах зміни працездатності її елементів в діапазоні експлуатаційних частот обертання насосу оливи. Наведені результати вказують на обмеженість існуючих засобів діагностування працездатності елементів СЗ, а також відсутність можливостей забезпечення необхідної повноти діагностування навіть при можливості додаткового вимірювання тиску безпосередньо в контурі подачі, очищення та охолодження моторної оливи. Внаслідок впливу запобіжного клапану на показники тиску як в контурі, так і в напірній магістралі СЗ, компенсувати відсутність діагностичної інформації можливо шляхом визначення витрати моторної оливи через запобіжний клапан. Оскільки встановлення обладнання для вимірювання витрати моторної оливи не використовується в системах діагностування високообертових ДВЗ, необхідно акцентувати увагу на розробці більш простих алгоритмів виявлення несправностей, наприклад шляхом реєстрації переміщення чи сили стискування пружини запобіжного клапану.

ЛІТЕРАТУРА

1. Денисов В.Г. Методы и средства технического диагностирования судовых энергетических установок: монография. Одесса: Феникс, 2008. 304 с.

2. Голуб Е.С., Мадорский Е.З., Розенберг Г.Ш. Диагностирование судовых технических средств: справочник. М.: Транспорт, 1993. 150 с.

3. Seth, B., Field,N. Oil Pressure Signatures for Engine Lubrication System Monitoring. SAE Technical Paper, Letter840063, 1984, pp.364-371. https://doi.org/10.4271/840063

4. Gritsenko, A.V., Zadorozhnaya, E.A., Shepelev, V.D. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading.Tribology in Industry, 2. 2018. pp. 300-310.doi:10.24874/ti.2018.40.02.13.

5. Dhar Sujan, et al. Transient, Three Dimensional CFD Model of the Complete Engine Lubrication System.SAE International Journal of Engines, vol. 9, issue3. 2022. pp. 54-62.

6. Савчук В.П., Білоусов Є.В., Зінченко Д.О., Бойко М.О. Система моніторингу шатунних підшипників колінчастих валів суднових двигунів внутрішнього згоряння. Розвиток транспорту. 2022. №1(12). С. 64-74. http://dx.doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06

7. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Акімов О.В. Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малообертового суднового дизельного двигуна Wartsila RT-Flex82C. Розвиток транспорту. 2021. №1(8). С. 91-102. https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09

8. Savchuk, V., Kuhtov, V., Gritsuk, I., Podrigalo, M. et al., Providing of Sliding Bearings Reliability of Transmissions Gear Wheels of Transport Cars by Optimization of Assembly Tolerances. SAE Technical Paper 2020-01-2239. 2020. https://doi.org/10.4271/2020-01-2239

9. Савчук В.П., Кухаренок Г.М., Курносенко Д.В., Котов А.І. Дослідження впливу конструктивних та експлуатаційних факторів системи мащення високообертових суднових двигунів внутрішнього згоряння на характер пульсацій тиску масла // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.-практ. конф., 08-10 вер. 2020 р.: тези доп. Херсон: ХДМА, 2020. С. 208 – 211.

10. Савчук В.П., Курносенко Д.В., Тулученко Г.Я., Котов А.І. Вдосконалення діагностування елементів систем мащення суднових високообертових двигунів внутрішнього згоряння // 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. 33 – 38.

11. Курносенко Д.В., Савчук В.П., Білоусов Є.В., Дзигар А.К., Котов А.І. Стенд для дослідження параметрів елементів систем мащення високообертових двигунів внутрішнього

згоряння. Двигуни внутрішнього згоряння. 2021. № 2. С. 73–79. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.10

12. Курносенко Д.В., Савчук В.П., Білоусов Є.В. Дослідження впливу характеристик масляних фільтрів типу «spin-on» на робочі параметри масляної системи. Розвиток транспорту. 2021. № 4(11). С. 52-64. https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.05

13. Двигатели Д-246.1, Д-246.2, Д-246.3, Д-246.4: руководство по эксплуатации. Минск, 2010. 104 с.

14. Рыбкин Е.А., Усов А.А. Шестеренные насосы для металлорежущих станков. М.: МАШГИЗ, 1960. 188 с.

REFERENCES

1. Denysov V.H. Methods and means of technical diagnostics of ship power plants: monograph [*Metody i sredstva tekhnycheskoho dyahnostyrovanyia sudovykh enerhetycheskykh ustanovok: monohrafyia*]. Odessa: Fenyks, 2008. 304 p.

2. Holub E.S., Madorskyi E.Z., Rozenberh H.Sh. Diagnostics of ship technical equipment: reference book [*Dyahnostyrovanye sudovykh tekhnycheskykh sredstv: spravochnyk*]. M.: Transport, 1993. 150 p.

3. Seth, B., Field,N. Oil Pressure Signatures for Engine Lubrication System Monitoring. SAE Technical Paper, Letter840063, 1984, pp.364-371. https://doi.org/10.4271/840063

4. Gritsenko, A.V., Zadorozhnaya, E.A., Shepelev, V.D. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading.Tribology in Industry, 2. 2018. pp. 300-310.doi:10.24874/ti.2018.40.02.13.

5. Dhar Sujan, et al. Transient, Three Dimensional CFD Model of the Complete Engine Lubrication System.SAE International Journal of Engines, vol. 9, issue3. 2022. pp. 54-62.

6. Savchuk V.P., Bilousov Ye.V., Zinchenko D.O., Boiko M.O. Monitoring system of connecting rod bearings of crankshafts of marine internal combustion engines [*Systema monitorynhu shatunnykh pidshypnykiv kolinchastykh valiv sudnovykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia*]. Transport development. 2022. №1(12). Pp. 64-74. http://dx.doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06

7. Savchuk V.P., Zinchenko D.O., Akimov O.V. Simulation of operating parameters of butterfly bearings of a low-speed marine diesel engine WARTSILA RT-FLEX82C [*Modeliuvannia robochykh parametriv motylevykh pidshypnykiv maloobertovoho sudnovoho dyzelnoho dvyhuna WARTSILA RT-FLEX82C*]. Transport development. 2021. №1(8). S. 91-102. https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09

8. Savchuk, V., Kuhtov, V., Gritsuk, I., Podrigalo, M. et al., Providing of Sliding Bearings Reliability of Transmissions Gear Wheels of Transport Cars by Optimization of Assembly Tolerances. SAE Technical Paper 2020-01-2239. 2020. https://doi.org/10.4271/2020-01-2239

9. Savchuk V.P., Kukharenok H.M., Kurnosenko D.V., Kotov A.I. Study of the impact of structural and operational factors of the lubrication system of high-speed marine internal combustion engines on the nature of oil pressure pulsations [*Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh ta ekspluatatsiinykh faktoriv systemy mashchennia vysokoobertovykh sudnovykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia na kharakter pulsatsii tysku masla*] // Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, September 8-10, 2020: abstracts of the report.. Kherson: KSMA, 2020. Pp. 208 – 211.

10. Savchuk V.P., Kurnosenko D.V., Tuluchenko H.Ia., Kotov A.I. Improvement of diagnostics of elements of lubrication systems of marine high-speed internal combustion engines [*Vdoskonalennia diahnostuvannia elementiv system mashchennia sudnovykh vysokoobertovykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia*] // Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, September 8-10, 2022: abstracts of the report.. Kherson: KSMA. 2022. Pp. 33 – 38.

11. Kurnosenko D.V., Savchuk V.P., Bilousov Ye.V., Dzyhar A.K., Kotov A.I. Stand for researching parameters of elements of lubrication systems of high-speed internal combustion engines [*Stend dlia doslidzhennia parametriv elementiv system mashchennia vysokoobertovykh dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia*]. Internal combustion engines. 2021. № 2. Pp. 73–79. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.10

12. Kurnosenko D.V., Savchuk V.P., Bilousov Ye.V. Study of the influence of the characteristics of oil filters of the "spin-on" type on the operating parameters of the oil system [*Doslidzhennia vplyvu kharakterystyk maslianykh filtriv typu «spin-on» na robochi parametry maslianoi systemy*]. Transport development. 2021. № 4(11). Pp. 52-64. https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.05

13. Engines D-246.1, D-246.2, D-246.3, D-246.4: instruction manual [*Dvyhately D-246.1, D-246.2, D-246.3, D-246.4: rukovodstvo po ekspluatatsyy*]. Minsk, 2010. 104 s.

14. Rybkyn E.A., Usov A.A. Gear pumps for metal cutting machines [*Shesterennыe nasosy dlia metallorezhushchykh stankov*]. M.: MAShHYZ, 1960. 188 s.

Savchuk V.P., Kurnosenko D.V., Bilousov Ye.V., Satulov A.I.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF TYPICAL MALFUNCTIONS ON THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF LUBRICATION SYSTEMS FOR HIGH-SPEED DIESEL ENGINES

An effective way to improve the reliability and, in general, the reliability of bearing units of the crank mechanism (CM) is to develop new and improve existing methods for diagnosing their performance and the performance of lubrication systems (LS) without taking the engines out of service. This is especially relevant for main marine internal combustion engines (ICEs) operating under conditions of prolonged continuous operation at various load conditions. In practice, indirect methods are used to assess the performance of CMM bearings by monitoring indicators of functional parameters: oil temperature at the inlet and outlet of the bearings, oil vapor concentration in the diesel engine crankcase, etc. Additionally, the performance of the lubricant system is assessed by monitoring the oil pressure at the engine inlet, and periodic monitoring of its viscosity, which is the main indicator that ensures the performance of plain bearings. When searching for diagnostic algorithms for the sliding bearings, two diagnostic circuits were identified: the engine oil supply, purification, and cooling circuit and the bearing lubrication and piston cooling circuit. Before analyzing the correlations between the diagnostic parameters, the main faults were identified: contamination of the oil receiver grid, wear of oil pump parts, jamming of the safety valve spool, intense contamination of the oil filter, and deviation of the engine oil viscosity from the manufacturer's specified range. To determine the characteristics of the elements of the SC, a number of experimental bench studies were conducted under various conditions of its operation: in the absence of deviations of operating parameters from the standard ones; at increased consumption of engine oil through the main oil line; at an increased value of resistance on the engine oil suction line; at an increased value of resistance of the oil filter (operation of a diesel engine with an oil filter with significant contamination of the filter element); at a fixed open position of the safety valve spool. These results indicate the insufficiency of the existing means of diagnosing the performance of the elements of the SC, as well as the lack of opportunities to ensure the necessary completeness of diagnostics, even with the possibility of additional pressure measurement directly in the circuit of the engine oil supply, purification and cooling system. Due to the influence of the safety valve on the pressure indicators both in the circuit and in the pressure line, it is possible to compensate for the lack of diagnostic information by determining the flow of engine oil through the safety valve.

Keywords: *high-speed internal combustion engine, lubrication system, oil filter, oil pump, safety valve.*

УДК 656.62 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.15

Корякін К.С.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РІВНЯ НАДІЙНОСТІ СУДНОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Інтенсифікація використання морського флоту призводить як до збільшення його чисельності, так і до зростання інтенсивності судноплавства на морських шляхах, а особливо у вузькостях, на підходах до морських портів та їх акваторіях. У зв'язку з цим останні двадцять років морський транспорт захопили глобалістські світові процеси модернізації та уніфікації систем забезпечення безпеки мореплавання (систем радіозв'язку, навігації, екологічної та пожежної безпеки тощо). У свою чергу, складність, відповідальність та унікальність завдань, які вирішує радіоелектронна апаратура на морському транспорті в даний час, визначають до них високі вимоги, важлива роль серед яких належить кількісним вимогам щодо надійності. Багатогранність та складність експлуатації ускладнюють створення однозначних рекомендацій щодо експлуатації суднової радіоелектроніки. В даній статті розглядається, що таке екплуатаційна надійність, яка модель аналізу надійності використовується для визначення запасу міцності радіоелектронних систем і які компоненти її складають, проаналізовано вплив експлуатаційних факторів на надійність суднових радіолокаційних станцій.

Ключові слова: експлуатаційна надійність, радіолокаційні системи, суднові системи, безпека плавання, уніфікація систем, методи теорії надійності, процес технічної експлуатації.

Вступ. На сьогоднішній день морський транспорт є складовою світових трансконтинентальних та інтермодальних транспортних коридорів, що забезпечують економічну інтеграцію країн у світовому співтоваристві, займаючи третє місце за вантажообігом після залізничного та трубопровідного транспорту. Він істотно впливає на світову економіку, оскільки є повноправним учасником світового ринку транспортних послуг і здійснює великомасштабні (по тоннажу та дальності) перевезення за більш низьких цін порівняно з іншими способами транспортування. Існуюча на сьогоднішній день тенденція веде до подальшого збільшення числа суднових радіоелектронних засобів, а також зростання їх технічної складності. Це пов'язано з тим, що відмова одного з навігаційних технічних пристроїв може призвести до катастрофічних наслідків [5].

Розвиток сучасної радіоелектронної апаратури характеризується значним збільшенням її складності та зростанням важливості розв'язуваних функціональних завдань. Ускладнення зумовлює необхідність підвищення гарантії своєчасності та правильності вирішення завдань [20]. Ці чинники визначили необхідність розробки наукових засад експлуатації радіоелектронної апаратури.

У широкому значенні слово "експлуатація" означає систематичне використання людиною продуктивних сил. У технічному плані експлуатацію можна розглядати як процес використання (управління) оператором об'єкта задля досягнення заданого результату. Як процес експлуатація має характеризуватись часом та місцем дії [16, 17].

Процес експлуатації охоплює період існування об'єкта з його виготовлення. Закінчення експлуатації об'єкта визначається його граничним станом, тобто станом, при якому його подальша експлуатація повинна бути припинена через непереборне порушення вимог безпеки,

або непереборне догляд заданих параметрів за встановлені межі, або непереборне зниження ефективності експлуатації нижче за допустиму, або необхідність проведення середнього або капітального ремонту (ознаки граничного стану задаються нормативно-технічною документацією на об'єкт). Так як об'єкт експлуатується в різних умовах, необхідно знати можливі результати впливу цих умов [7, 12]. Крім зовнішніх факторів на поведінку об'єкта впливатимуть особливості його конструювання, виготовлення та налагодження. Важливе значення мають ступінь підготовленості операторів, які експлуатують об'єкт, та його психофизнологическое стан. Дослідження поведінки об'єкта під час експлуатації та оцінка його експлуатаційних якостей становить предмет теорії надійності.

Постановка проблеми. Рівень надійності радіоелектронного устаткування, досягнутий на стадії конструювання та виготовлення, значною мірою визначає ефективність застосування їх у системах забезпечення безпеки мореплавання, причому основне зниження ефективності, тобто. якості виконуваних функцій, у процесі експлуатації пов'язані з зниженням надійності. Виходячи з того, що етап експлуатації радіоелектронної апаратури охоплює тривалий період часу, то під впливом різних зовнішніх факторів, а також швидкого фізичного зношування, внаслідок несприятливих морських умов функціонування (вологість, вібрації, температура та ін.), може відбутися зміна рівня властивостей (значень вихідних параметрів), що визначають якість радіоелектронної апаратури та ефективність їх функціонування.

Мета статті полягає у дослідженні шляхів підвищення рівня експлуатаційної надійності суднових радіолокаційних систем для забезпечення безперебійної роботи суднового обладнання та підвищення безпеки плавання. Метою є пошук технічних рішень та правил експлуатації, що сприяють підвищенню надійності радіолокаційних систем для забезпечення безпеки плавання в складних умовах експлуатації суден.

Основна частина. У процесі експлуатації складних технічних систем важливо знати, яким запасом надійності має система, якою є роль обслуговуючого персоналу у справі підтримки надійності на прийнятному рівні, які блоки, вузли, елементи системи працюють найбільш ненадійно і вимагають проведення в централізованому порядку запобіжних замін, регулювань або доробок. Сучасна теорія надійності ґрунтується на методах теорії ймовірностей та випадкових процесів, математичної логіки, теорії масового обслуговування та ін. Розрахунки основних показників надійності, засновані на тому, що за певної структури системи та існуючого закону розподілу напрацювання на відмову існують цілком певні залежності між показниками надійності окремих елементів та надійності системи в цілому [3, 13, 14]. При цьому обрана модель аналізу надійності має адекватно відображати функціонування системи в реальних умовах з точки зору досліджуваних властивостей. На стадії проектування системи отримані кількісні характеристики надійності дозволяють сформулювати вимоги до надійності нової апаратури, вибрати найбільш підходящий варіант структури, порівнювати надійність різних елементів і оцінювати їх вплив на надійність всієї системи, розраховувати терміни служби, необхідну кількість запасних деталей, вибрати заходи щодо підвищення надійності (резервування, технічне обслуговування та ремонт та ін.). В процесі експлуатації прийнято говорити про експлуатаційну надійність системи, під якою розуміють властивість системи безвідмовно працювати протягом певного інтервалу часу в заданих умовах експлуатації за дотримання встановлених правилами технічної експлуатації (ПТЕ) заходів технічного обслуговування та поточного ремонту [20].

Теорія ймовірності для побудови моделі експлуатаційної надійності

До теперішнього часу в теорії та практиці надійності найбільшого розвитку набув напрямок, заснований на використанні тільки імовірнісних концепцій (теорія ймовірності). У цьому випадку відмови розглядаються як деякі абстрактні випадкові події, а різноманітні фізичні стани приладів та систем звільняться до двох станів: справності та несправності. У ході експлуатації системи також можуть виявлятися та усуватися помилки [16]. Якщо при їх виправленні не вносяться нові помилки або менше, ніж усувається, то в ході експлуатації надійність системи безперервно зростає. Чим інтенсивніше проводиться експлуатація, тим

інтенсивніше виявляються помилки і зростає надійність. Методологія отримання кінцевих результатів про надійність приладів та систем відповідно до вірогідної (статистичної) теорії полягає в тому, що на підставі випробувань або експлуатації отримують статистику відмов, приладів та систем.

У процесі функціонування технічна система, з погляду надійності, проходить три періоди: приробітку, нормального функціонування та старіння. Оскільки елементи радіоелектронних систем мають велике значення напрацювання на поступову відмову (старіння та фізичне зношування обладнання відбувається значніше пізніше, ніж станеться раптова відмова з великою часткою ймовірності або моральне старіння), то для них виправдано і широко застосовується гіпотетичне припущення експоненційного розподілу часу напрацювання системи на відмову що відповідає періоду нормальної експлуатації, на якому в основному в системі відбуваються раптові відмови. Однак, складність взаємодії елементів складних систем та зміна їх властивостей у часі внаслідок експлуатаційних навантажень, призводить до необхідності застосування методів аналізу експлуатаційної надійності, які враховують наявність взаємозв'язку між великим числом факторів, що визначають поведінку системи, що розглядається в процесі її експлуатації в реальних умовах, а також зміни у часі властивостей системи та зовнішнього середовища. Крім цього, необхідно враховувати результат дії зовнішніх випадкових факторів і так званого людського фактора, що є причиною невизначеності у поведінці системи загалом. Такий підхід ефективний для дослідження складних систем, котрим виявляються непридатними традиційні, зазвичай, прикидочные чи орієнтовні методи аналізу надійності, засновані на почерговому вивченні окремих властивостей системи чи окремих явищ, що значно полегшує об'єкт розгляду.

Таким чином, застосування більш повних методів аналізу експлуатаційної надійності складних радіоелектронних систем, що враховують більшу кількість факторів та умов експлуатації, дозволяє з більшою точністю спрогнозувати можливі відмови та передбачити всі необхідні заходи забезпечення необхідного високого рівня експлуатаційної надійності складної системи, що у свою чергу зменшує час простою. системи та, як наслідок, знижує збитки від аварійності на морському транспорті.

При розробці моделі експлуатаційної надійності суднового радіолокаційного обладнання в тривалому автономному плаванні необхідно враховувати надійність не тільки власне технічних засобів, а й надійності системи технічної експлуатації, що по-новому складається, що здійснюється без виконання традиційних ремонтних процедур, доступних тільки висококваліфікованим фахівцям. Експлуатація суднових радіолокаційних станцій операторами-судноводіями передбачає підхід до відновлення працездатності РЛС, який став можливим в останні десятиліття у зв'язку з розвитком модульної та мікромодульної компонування електронних приладів та розвитком техніки великих інтегральних схем. Що дозволило замінити традиційні ремонтні роботи, що виконуються радіофахівцями, процедурами напівавтоматичного та автоматичного відновлення роботи РЛС заміною тих чи інших модулів; необхідність та адреса заміни при цьому підказується відповідними системами, які виконують діагностику вбудованими в судновий комплекс РЛС модулями. Це забезпечує зниження вимог до кваліфікації людини-оператора, відповідальної за експлуатацію та відновлення працездатності РЛС, обмежує безпосередньо живу участь оператора-судноводця у пошуку несправності, у знаходженні потрібного рішення, та відновлення втраченої працездатності радіолокаційної системи. Таким чином, один із шляхів підвищення експлуатаційної надійності РЛС досяжний методами значного скорочення часу відновлення вузла РЛС, що відмовив.

Марківська модель аналізу експлуатаційної надійності суднових радіоелектронних засобів

Аналіз причин відмов складних радіоелектронних систем показує, що у реальних умовах функціонування відмови апаратури зазвичай трапляються через відмов елементів, які у результаті впливу зовнішніх несприятливих чинників, і у результаті процесів старіння і зношування, які призводять до поступової деградації основних параметрів систем. Для морського радіообладнання це особливо характерно, так як дія факторів, що дестабілізують, на

швидкість зміни визначальних параметрів, велике, що обумовлено поступовими змінами параметрів тих або інших елементів, що входять до їх складу; поступові відмови можуть бути викликані або занадто великими відхиленнями параметрів елементів, або помилками визначення допусків на ці параметри. Розгляд зміни показників надійності в процесі експлуатації радіоелектронних систем при спільному прояві раптових та поступових відмов можливий за допомогою Марківського процесу, що характеризується дискретним часом та кінцевою множиною станів [12, 14]. У моделях, що базуються на процесі Маркова, передбачається, що кількість дефектів, виявлених у будь-який момент часу, залежить від поведінки системи і представляється у вигляді стаціонарного ланцюга Маркова. При цьому кількість дефектів кінцева, але є невідомою величиною, яка задається для моделі у вигляді константи. Інтенсивність відмов залежить лише кількості дефектів. До цієї групи моделей відносяться: Джелінскі-Моранди, Шика-Вулвертона, Шантикумера та ін.

Якщо інтервал експлуатації системи, що розглядається, занадто великий в порівнянні з напрацюванням системи на відмову, то не можна знехтувати старінням складових елементів, в такому випадку закон надійності буде істотно відмінний від експоненційного і для аналізу надійності можливо використовувати більш загальну модель марківських неоднорідних процесів з безперервним часом і дискретними станами (див. Рис. 1).

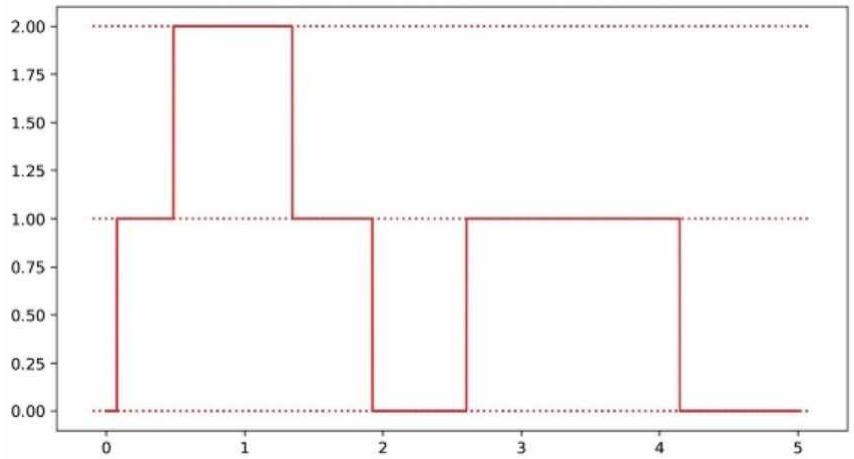


Рисунок 1- Випадковий процес з безперервним часом та дискретним станом

Модель марковського процесу можна подати у вигляді графа, в якому стани (вершини) пов'язані між собою зв'язками (переходами з і-го стану в j-й стан) (Рис. 2)

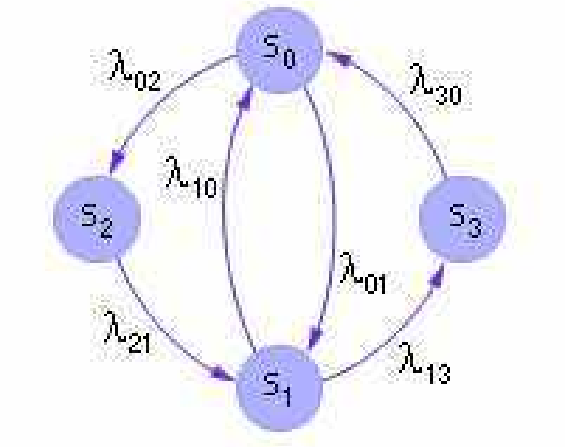


Рисунок 2 - Приклад графа марківського процесу з безперервним часом

Кожен перехід характеризується густиною ймовірності переходу λij. За визначенням:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

де P_{ij} - ймовірність переходу із стану i у стан j за проміжок часу Δt.

У цьому щільність розуміють як розподіл ймовірності у часі. Перехід із і-го стану в j-е відбувається у випадкові моменти часу, що визначаються інтенсивністю переходу λij.

Очевидно, система з будь-якого і-го стану може перейти в один із кількох станів j, j + 1, j + 2, …, пов'язаних з ним переходами λij, λij + 1, λij + 2, …. і лише в те, перехід у який настане раніше.

Тому із послідовності часів: τij, τij + 1, τij + 2 і т. д. треба вибрати мінімальне та визначити індекс j, що вказує, в який саме стан відбудеться перехід.

Динаміка переходу системи з одного стану в інший можна описувати системою диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

Методи підвищення експлуатаційної надійності.

Процес старіння технічних систем визначається внутрішніми фізичними процесами, такими як зношування, втома тощо. При цьому як теоретичні розподіли напрацювання до відмови можуть бути використані будь-які безперервні розподіли, що застосовуються в теорії ймовірностей, з монотонно зростаючою функцією інтенсивності в часі.

Важливим фактором підвищення надійності є правильний вибір режимів роботи елементів. Вважається, що оптимальні електричні навантаження елементів не повинні перевищувати 25% номінальних. У менш відповідальних випадках їх можна збільшити до 40% і більше. Застосовувані матеріали повинні мати таку швидкість старіння, яка б забезпечувала нормальну експлуатацію апаратури протягом усього терміну служби і зберігала б необхідні механічні та електричні характеристики.

До експлуатаційної групи підвищення надійності належать чинники, що впливають надійність РЛС у процесі експлуатації. Вони у свою чергу складаються з груп об'єктивних факторів (вплив довкілля тощо) та групи суб'єктивних факторів, пов'язаних з підготовкою обслуговуючого персоналу, організацією експлуатації і т.п.

При відповідній організації експлуатації можна зменшити вплив як тієї, так і іншої групи факторів на надійність РЛС, що підвищить значення надійності та збільшить напрацювання на відмову.

Для збільшення значення коефіцієнта готовності необхідно проводити заходи, що сприяють:

а) збільшення часу напрацювання на відмову;

б) зменшення часу простою.

Слід зазначити, що найпростіше та з достатнім ефектом реалізуються заходи другої групи. До них необхідно віднести:

а) підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу;

б) покращення організації технічного обслуговування;

в) удосконалення технічних засобів обслуговування;

г) прогнозування поступових відмов; .

д) зменшення часу на відшукання та усунення відмов.

Підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу насамперед передбачає поглиблене вивчення конкретної РЛС, особливостей її експлуатації, досвіду експлуатації такого типу апаратури тощо. Це допомагає свідомо експлуатувати апаратуру, найефективніше проводити профілактичні заходи, скорочувати час для відшукання та усунення несправностей.

Поліпшення організації технічного обслуговування передбачає таку організацію, коли мінімальна витрата сил і коштів забезпечив би найбільше значення коефіцієнта готовності.

Сюди входять питання підготовки обслуговуючого персоналу, планування профілактичних робіт (з урахуванням рекомендацій теорії надійності та досвіду експлуатації

РЛС, забезпечення технічними засобами профілактичних робіт (різна дногностична та профілактична апаратура), автоматизація контролю стану радіоелектроніки, плавання запасних елементів і вузлів тощо.

Організація прогнозування поступових відмов дозволяє підвищити можливість безвідмовної роботи протягом часу експлуатації. Вважаючи поступові та раптові відмови взаємонезалежними відповідно до виразу $К_г = \frac{Т}{Т+Т_в}$, де $К_г$ - коефіцієнт готовності, Т - напрацювання на відмову та $Т_в$ - середній час відновлення можна записати:

$$К_{г.в} = \frac{Т_{р\sum в}}{Т_{р\sum в}+Т_{п\sum в}};\ К_{г\,п} = \frac{Т_{р\sum п}}{Т_{р\sum п}+Т_{п\sum п}}, \quad (2)$$

де $Т_{р\sum в}$ і $Т_{р\sum п}$ - загальний час напрацювання елемента відповідно між раптовими та поступовими відмовими за деякий час експлуатації;

$Т_{п\sum в}$ і $Т_{п\sum п}$ - загальний час простою елемента відповідно через раптові та поступові відмови за той же час експлуатації.

На рис. 3 [20] наведено характеристику процесу експлуатації деякого об'єкта протягом певного часу. За цей час в об'єкті мало місце М відмов, з них m поступових і n раптових.

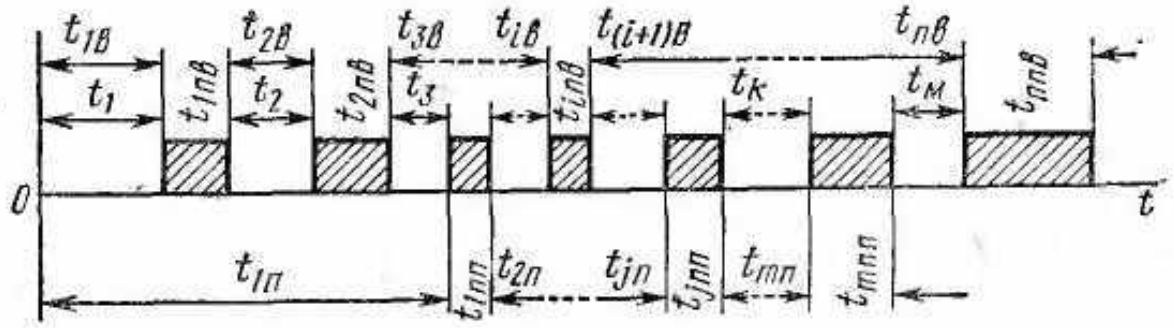


Рисунок 3 - Характеристика процесу експлуатації з урахуванням раптових та поступових відмов.

Для цього випадку можна записати:

$$Т_{р\sum в} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_{iв} = \frac{1}{n}\left(\sum_{k=1}^{M} t_k + \sum_{i=1}^{m} t_{jпп}\right);$$

$$Т_{р\sum п} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} t_{jп} = \frac{1}{m}\left(\sum_{k=1}^{M} t_k + \sum_{i=1}^{n} t_{iпв}\right), \quad (3)$$

де $\sum_{k=1}^{M} t_k = МТ$ - загальний час роботи об'єкта за період експлуатації;

$\sum_{i=1}^{m} t_{jпп} = mT_{п\sum п}$- загальний час простою об'єкта через поступові відмови за період експлуатації;

$\sum_{i=1}^{n} t_{iпв} = nT_{n\sum в}$- загальний час простою об'єкта через раптові відмови за період експлуатації.

Підставляючи ці значення вираз 2 і зробивши необхідні перетворення, можна записати:

$$K_{г.в} + K_{г.п} = \frac{MT}{MT+mT_{п\sum п}+nT_{п\sum п}} + 1 \quad (4)$$

Враховуючи що $K_г = \frac{MT}{MT+mT_{п\sum п}+nT_{п\sum в}}$ є загальний коефіцієнт готовності, остаточно можна записати:

$$K_г = K_{г.в} + K_{г.п} - 1 \quad (5)$$

Як випливає з виразу (5) прогнозування поступових відмов дозволяє збільшити значення загального коефіцієнта готовності об'єкта.

Оскільки значення коефіцієнта $K_{г.в}$, переважно визначається середнім часом відшукання елементів, що відмовили, то основну увагу необхідно приділяти полегшенню пошуку елемента, що відмовив, а також прогнозуванню можливих відмов (діагностиці). Час відшукання елемента, що відмовив, може коливатися в значних межах - від декількох хвилин до десятків годин. Прогнозування відмов, програмування пошуку елементів, що відмовили дозволяють зменшити цей час у кілька разів.

Якщо врахувати, що поступові відмови становлять до 50% від загальної кількості відмов, можна вважати, що $T_{\text{п}\sum\text{в}} = T_{\text{п}\sum\text{п}}$. З урахуванням цього вираз (5) набуде вигляду:

$$K_{\text{г.в}} = K_{\text{г п}} = 0{,}5(1 + K_{\text{г}}) \quad (6)$$

Вважаючи для складних радіоелектронних приладів, якими є РЛС значення $K_{\text{г}} = 0{,}5 \div 0{,}9$ можна отримати для коефіцієнта готовності під час прогнозування поступових відмов $K_{\text{г п}} = 0{,}75 \div 0{,}95$.

Висновки. Розглянуті методи забезпечення експлуатаційного рівня надійності РЛС. Запропоновано марківську модель, в основі якої лежить неоднорідний марківський процес, для опису функціонування елемента з довільними законами надійності, якщо відновлення елемента, що відмовив, не змінює характеристик його безвідмовності, тобто після відновлення працездатності інтенсивність відмови елемента зберігається такою самою, якою вона була б, якби елемент весь цей час перебував у працездатному стані.

Розглянута модель дозволяє обчислити такі характеристики надійності системи:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- функцію готовності;
- середнє напрацювання до відмови;
- Коефіцієнт готовності;
- напрацювання на відмову;
- Середній час відновлення.

Визначено, що експлуатаційна група факторів містить низку складових, що сприяють підвищенню надійності РЛС, які можуть бути реалізовані як у період проектування та виготовлення апаратури, так і в період її безпосередньої експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems -Part 1: General requirements [Text]. – impl. 01.05.2010. – Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. – 68 p.

2. Скляр, В.В. Элементы методологии анализа функциональной безопасности информационно-управляющих систем / В.В. Скляр //Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2009. - № 6. - С.75-79.

3. ДСТУ 8647:2016. Надійність техніки. Оцінювання і прогнозування надійності за результатами випробувань и/или експлуатації в умовах малої кількості відмов. К.: Видавництво Держстандарту України, 2017. 23 с.

4. Перроті А. І. Карташов Г. Д. Цретаєв К. М. Основи прискорених випробувань радіоелементів на надійність - М: Рад. радіо, 1968.-224 с.

5. Мищенко И.В. Постановка задачи надежности при транспортировке опасных грузов с учетом внешнего случайного кинематического воздействия / И.В.Мищенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 5. ñ Харків: Фоліо, 2006.-С. 150-155..

6. Ma, J.; Fouladirad, M.; Grall, A. Flexible Wind Speed Generation Model: Markov Chain with an Embedded Diffusion Process. Energy 2018, 164, 316–328 с.

7. Азарсков В. Н.; Стрельников, В. П. Надійність систем управління та автоматики. Київ. НАУ. 2004. 164 с.

8. Стрельников В.П., Федухін А. В, Яковлєв М.Ф. Імовірно-фізичний підхід до розрахунку показників надійності механічних вузлів засобів обчислювальної техніки // Математичні машини та системи. – 1997. – № 2. – 101-113 с.

9. Федухін А. В., Сеспедес-Гарсія Н. В. Уточнений розрахунок надійності електронних пристроїв на основі DN-розподілу // Математичні машини та системи. – 2000. – № 2, 3. – 170-175 с.

10. Стрельников В. П., Бутенко Л.І., Лучанський А.М. та ін. Методичні рекомендації щодо експериментальної оцінки показників надійності ЕОМ / — Київ: Ін-т кібернетики АН Україна, 1987 -61 с.

11. Abinandhitha, R.; Sakthivel, R.; Kong, F.; Parivalla, A. Robust Non-Fragile Boundary Control for Non-Linear Parabolic PDE Systems with Semi-Markov Switching and Input Quantization. Eur. J. Control 2022, 67, 100713.

12. Бєлов Ф. І., Соловейчик Ф. С. Питання надійності радіоелектронної апаратури. Держенергоізлат. 1961.

13. Вентцель Є. С. Теорія ймовірностей. Фізматгіз, 1962.

14. Гнеденко Б. В. Ідр. Математичні методи теорії надії. "Наука", 1965.

15. Гнеденко Б.В., Бєляєв Ю.К., Соловйов А.Д. Математичні методи теорії надійності. -М: Наука, 1965. 524 с.

16. Луцький В. А: Розрахунок надійності та ефективності раліоелектронної апаратури. Вид-во АН УРСР, 1963.

17. Ликов І. А. Основи надійності радіоелектронної апаратури. АРТА ім. Л. А. Говорова, 1962.

18. Надійність радіоелектронної апаратури, «Радянське радно». 1960.

19. Проблеми надійності радіоелектронної апаратури. Пров. з айгл-під ред. Б. Є. Бердичевського. Оборонгіз. 1960.

20. Основи експлуатації радіоелектронної апаратури: Навч. посібник для студентів вузів/А. К. Бикадоров, Л. І. Кульбак, В. Ю. Лавриненко та ін. За ред. В. Ю: Лавріненко. - 2-ге вид, перероб. та дод. – Вищ. школа, 1978. - 320 с..

REFERENCE

1. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements [Text]. - impl. 05/01/2010. - Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. - 68 p.

2. Sklyar, V.V. Elements of the methodology of analysis of functional security of information-management systems / V.V. Sklyar //Radioelectronic and computer systems. - 2009. - No. 6. - P.75-79.

3. DSTU 8647:2016. Reliability of equipment. Evaluation and prediction of reliability based on the results of tests and/or operation in conditions of a small number of failures. K.: Derzhstandartu Publishing House of Ukraine, 2017. 23 p.

4. Perrotti A. I. Kartashov G. D. Tsretaev K. M. Fundamentals of accelerated reliability tests of radio elements - M: Rad. radio, 1968.-224 c.

5. Myshchenko I.V. Setting the problem of reliability in the transportation of dangerous goods taking into account the external random kinematic impact / I.V. Myshchenko // Problems of emergency situations. Coll. of science Ave. UCC of Ukraine. Vol. 5. ñ Kharkiv: Folio, 2006.-S. 150-155.

6. Ma, J.; Fouladirad, M.; Grall, A. Flexible Wind Speed Generation Model: Markov Chain with an Embedded Diffusion Process. Energy 2018, 164, 316–328 c.

7. Azarskov V.N.; Strelnikov, V. P. Reliability of control and automation systems. Kyiv. NAU 2004. 164 p.

8. Strelnikov V.P., Fedukhin A.V, Yakovlev M.F. A probabilistic-physical approach to the calculation of reliability indicators of mechanical units of computing equipment // Mathematical machines and systems. - 1997. - No. 2. - 101-113 c.

9. Fedukhin A.V., Cespedes-Garcia N.V. Refined calculation of reliability of electronic devices based on DN-distribution // Mathematical machines and systems. – 2000. – No. 2, 3. – 170-175 c.

10. Strelnikov V.P., Butenko L.I., Luchanskyi A.M. etc. Methodological recommendations for experimental evaluation of computer reliability indicators / — Kyiv: Institute of Cybernetics of the Academy of Sciences of Ukraine, 1987 -61 p.

11. Abinandhitha, R.; Sakthivel, R.; Kong, F.; Parivalla, A. Robust Non-Fragile Boundary Control for Non-Linear Parabolic PDE Systems with Semi-Markov Switching and Input Quantization. Eur. J. Control 2022, 67, 100713.

12. Belov F. I., Soloveitchik F. S. Reliability issues of radio electronic equipment. State Energy Ministry. 1961.

13. Wentzel E. S. The theory of probabilities. Fizmatgiz, 1962.

14. Hnedenko B. V. Idr. Mathematical methods of the theory of hope. "Science", 1965.

15. Hnedenko B.V., Belyaev Y.K., Solovyov A.D. Mathematical methods of reliability theory. - M: Nauka, 1965. 524 p.

16. Lutsky V. A.: Calculation of reliability and efficiency of radioelectronic equipment. Edition of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1963.

17. Lykov I. A. Fundamentals of reliability of radio electronic equipment. ARTA named after L. A. Govorova, 1962.

18. Reliability of radio-electronic equipment, "Soviet Council". 1960.

19. Problems of radio electronic equipment reliability. Prov. with eagle-ed. B. E. Berdychevskyi. Oborongiz. 1960.

20. Fundamentals of operation of radio-electronic equipment: Training. a guide for university students/A. K. Bykadorov, L. I. Kulbak, V. Yu. Lavrynenko, and others. Under the editorship V. Yu: Lavrinenko. - 2nd edition, revision. and add. - Higher. school, 1978. - 320 pp.

Koryakin K. S.

ENSURING THE OPERATIONAL LEVEL OF RELIABILITY OF THE SHIP'S RADAR EQUIPMENT

This article examines what operational reliability is, which model of reliability analysis is used to determine the margin of safety of radioelectronic systems and what components make it up, the influence of operational factors on the reliability of shipboard radar stations is analyzed. The intensification of the use of the sea fleet leads both to an increase in its number and to an increase in the intensity of navigation on sea routes, especially in the narrows, on the approaches to sea ports and their water areas. In this regard, the globalist world processes of modernization and unification of maritime safety systems (radio communication, navigation, environmental and fire safety systems, etc.) have taken over maritime transport in the last twenty years. In turn, the complexity, responsibility and uniqueness of the tasks solved by radio-electronic equipment on sea transport at the present time determine high requirements for them, an important role among which belongs to quantitative requirements for reliability. The versatility and complexity of operation make it difficult to create unequivocal recommendations for the operation of ship radio electronics.

Keywords: operational reliability, radar systems, ship systems, navigation safety, unification of systems, reliability theory methods, technical operation process.

УДК 656.61.053 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.16

Постніков Є.Є.

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ БУКСИРУВАННІ СЕЙСМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В статті удосконалено модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання. Особливістю моделі є її базування на теорії дифузійних процесів взаємодії активаторних сил середовища та інгібіторних сил на буксирній лінії, що забезпечує навігаційну безпеку буксирної системи з маломорехідним об'єктом, траєкторія якого асимптотично прагне до траєкторії буксирувальника, і дозволяє розрахувати ризики переходу буксируємої системи у небезпечний стан навігації із заданою ймовірністю і визначити часовий інтервал, протягом якого дана система буде знаходитись у навігаційній безпеці при розробці плану маршруту буксирування.

Ключові слова: *буксирування, людський фактор, морський транспорт, навігаційна ситуація, небезпеки, сейсмічне обладнання.*

Вступ.

Аварійність при проведенні буксирувальних операцій є об’єктивною реальністю, обумовленою, насамперед, зовнішніми й внутрішніми факторами, що супроводжують таку небезпечну операцію, і не завжди залежить від людини.

Впливаючи на ризики, можна досягти їх зниження лише до певного рівня на якомусь часовому проміжку, після чого вони знову почнуть зростати або, у кращому випадку, будуть тимчасово стабілізовані на кількісному або якісному рівні.

Для забезпечення безпечного буксирування сейсмічного обладнання виникає необхідність у створенні комплексу заходів [1, 2], що зводять до мінімуму вплив невірно прийнятих рішень на загальний стан безпечної експлуатації всієї системи буксирування. Основою цього комплексу заходів є система управління ризиками [3].

Основним фактором аварій на морі, які можуть перерости в надзвичайні ситуації, є порушення в сфері безпеки судноплавства. Статистика свідчить, що більшість з цих порушень призводять до навігаційних аварій. У свою чергу, найпоширенішою причиною навігаційних аварій, присутніх в 80% від їх кількості, є помилки судноводія [4, 5]. Таким чином, саме людський елемент ергатичної системи “судноводій”–“судно”–“середовище” в основному визначає ризик виникнення надзвичайної ситуації на морських суднах.

Однак завдання мінімізації ризику навігаційної ситуації, особливо при буксуванні маломорехідного об’єкту, може бути вирішене тільки за допомогою обґрунтування та впровадження ефективних процедур управління ризиком, перелік яких містить у собі ідентифікацію та прогнозування (оцінку) ризику, виявлення його факторів, обґрунтування та реалізацію заходів щодо зміни статусу цих факторів. Метою цих заходів є досягнення такого мінімального ризику навігаційної ситуації, що можливо лише за існуючих обставин та умов судноплавства. Вони можуть бути спрямовані як на зниження ймовірності виникнення навігаційної ситуації, так і на зменшення її наслідків.

Аналіз літературних джерел.

Завдання оцінювання ризиків навігаційних ситуації при виконанні буксирувальних операцій маломорехідних об’єктів знайшло рішення у роботах як вітчизняних, так і

закордонних дослідників й має декілька напрямків наукового дослідження.

Дослідниками, на роботи яких спирається автор, є Вагущенко Л.Л. [6], Мальцев А.С. [7], Нечаєв Ю.І. [8], Піпченко О.Д. [9, 10], Asuelimen G., Blanco-Davis E., Wang J [11], Fossen T.I. [12].

Метою статті є удосконалення модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання.

Основна частина.

Характерною рисою моделі безпечного плавання є розглянуті спрямовані переходи системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" з режиму безпечного плавання в режим небезпечного плавання, тобто урахування ризиків. Даний напрямок дослідження обумовлений необхідністю контролю стану безпеки навігації, при якому можна здійснювати рух по заданій смузі положення й з урахуванням фіксованої ймовірності знаходження сейсмічного обладнання та буксирувальника в цій смузі. Стан навігаційної безпеки при стаціонарному плаванні за заданим планом переходу курсу можна описати векторним лінійним рівнянням.

Припустимо, що для системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" зафіксована подія $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \Sigma$, яка показує, що має місце асимптотичне спрямування траєкторії сейсмічного обладнання до траєкторії буксирувальника. При асимптотичному спрямуванні траєкторії "маломорехідного" об'єкта до траєкторії буксирувальника переважають активаторні властивості середовища.

Взаємодія активаторних сил середовища та інгібіторних сил, що існують на буксирній лінії, може реалізовуватися в рамках математичних моделей дифузійних процесів. Якщо далі вважати цю гіпотезу можливою, то стан навігаційної безпеки системи при стаціонарному русі за заданим планом переходу курсу можна описати векторним лінійним рівнянням:

$$\frac{dY}{dt} = a(Y,t) + b(Y,t)\Theta, Y(t_0) = Y_0, \tag{1}$$

де Y – n-мірний вектор стану навігаційної безпеки системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання";

$a(Y,t)$ – n-мірний вектор;

$b(Y,t)$ – матриця порядку $n \times n$;

$\Theta(t)$ – вектор білого шуму Гаусса з математичним сподіванням $m(t)$ та матрицею інтенсивностей $G(t)$;

Y_0 – вектор початкового стану, із щільністю ймовірності $f(y_0)$ [13].

На підставі літературних джерел [63, 64] допустимо, що щільність ймовірності розподілу фазових координат $\omega(y,t)$ системи (3.25) при загальних припущеннях щодо можливості диференціювання функцій $a(Y,t)$ та $b(Y,t)$ може бути описана рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова:

$$\frac{\partial \omega(y,t)}{\partial t} = -div\, \pi(y,t),$$

де $\pi(y,t)$ – вектор щільності потоку ймовірності [13].

Його складові за позитивними напрямках осей координат дорівнюють:

$$\pi_i(y,t) = A_i(y,t)\omega(y,t) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial\left[B_{ij}(y,t)\omega(y,t)\right]}{\partial y_i}, \tag{2}$$

де A_i – коефіцієнт зносу;

B_{ij} – коефіцієнти дифузії, які для рівняння (2) визначаються за формулами:

$$A_i = a_0(y,r) + \frac{1}{2}\sum_{p.q.r=1}^{n} G_{pq}(t)B_{pq}(y,t)\frac{\partial B_{ir}(y,t)}{\partial y_p} + \sum_{j=1}^{n} B_{ij}(y,t)m_j(t),$$

$$B_{ij} = \sum_{p.q.r=1}^{n} G_{pq}(t)B_{iq}(y,t)\partial B_{jq}(y,t).$$

Рівняння (2) необхідно розглядати в якості рівняння збереження імовірності, при цьому кількість імовірності, яка проходить за одиницю часу в позитивному напрямку характеризується потоком π_i.

Виходячи з цього допустимо, що перехід системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" з безпечного навігаційного стану в небезпечне, визначається моментом його перетинання границь сфероїда S_q^{δ}, де відбувається процес поглинання [14]. Дане припущення підтверджується інтегруванням рівняння (2) при дотриманні заданих граничних умов, що випливають із фізичного змісту забезпечення безпечної навігації.

У зв'язку з цим доцільно наділити границю сфероїда S_q^{δ} функцією поглинання $v^*(y,t)$ [14]. При цьому поглинання станів навігації буксирної системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" описується узагальненим рівнянням Фоккера – Планка – Колмогорова [15]:

$$\frac{\partial \omega^*(y,t)}{\partial t} = -div\,\pi^*(y,t) - v^*(y,t), \tag{3}$$

де $\omega^*(y,t)$ – функція щільності ймовірності непоглинених станів;

$\pi^*(y,t)$ – вектор щільності потоку ймовірності з компонентами:

$$\pi_i^*(y,t) = A_i(y,t)\omega^*(y,t) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial\left[B_{ij}(y,t)\omega^*(y,t)\right]}{\partial y}.$$

При цьому $v^*(y,t)$ – щільність поглинання ймовірності (функція поглинання), відповідна події $x(t,x_0,\varepsilon) - x'(t,x_0,\varepsilon) \geq \Sigma$.

Щільність імовірності визначається умовами поглинання й в області зміни фазових координат характеризується функцією поглинання $v^*(y,t)$ [13]. Допустимо, що процес поглинання протікає на поверхні сфероїда і його можна описати рівнянням:

$$v^*(y,t) = \delta\big(a(y) - \gamma(t)\big)c_1(t)\big(n^0\pi(y,t)\big), \tag{4}$$

де $a(y) - \gamma(t)$ – параметричне рівняння гіперповерхні сфероїда, який є границею фазової області W;

δ – дельта-функція;

n^0 – зовнішня нормаль до поверхні сфероїда S_q^{δ};

$c_1(t)$ – коефіцієнт повноти поглинання.

Введення рівнянь поглинання дозволяє знайти рішення (3) для всієї області фазового

простору системи (1) при початковій умові $\omega^*(y,t) = f(y_0)$ і нульових граничних умовах для $y_i = \pm\infty (i = 1, \dots, n)$.

У даному випадку функція $\omega^*(y,t)$ не є нормованою за рахунок існування ефекту поглинання. Інтеграл від цієї функції по всій поверхні області фазового простору W дає можливість визначити поточну ймовірність знаходження буксирного системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" в безпечному стані, тобто:

$$P_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^*(y,t)\partial y \le 1,$$

при цьому для $t = t_0$ значення $P_1(t_0) = 1$. Тоді шукану поточну ймовірність переходу навігаційного процесу буксируємої системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" в небезпечний стан навігації з максимальною кількістю ризиків можна розрахувати за формулою:

$$P_0(t) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \omega^*(y,t)\partial y.$$

Для визначення значення функції $P_1(t)$ складемо диференційне рівняння її змін. Проінтегрувавши рівняння (3) по нескінченній області існування вектора Y, отримаємо диференціальне рівняння:

$$P_1^*(t) = -\int_{-\infty}^{\infty} v^*(y,t)\partial y, \tag{5}$$

оскільки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{div}\pi(y,t)\partial y = 0.$$

Далі, підставивши у праву частину (5) з (4) залежність $v^*(y,t)$ та нормуючи $\omega^*(y,t)$, отримаємо:

$$P_1^*(t) = P_1 c_1 - \int_S \left(n^0 \pi(y,t)\right)\partial y, \tag{6}$$

де S – поверхня заданого сфероїда S_q^δ;

$\pi(y,t)$ – нормалізований вектор потоку ймовірності, який дорівнює $\pi(y,t) = \frac{\pi^*(y,t)}{P_1(t)}$ і має компоненти:

$$\pi_i(y,t) = A_i(y,t)\omega(y,t) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial\left[B_{ij}(y,t)\omega(y,t)\right]}{\partial y_i}.$$

Таким чином, для подальших досліджень використовуємо нормовану щільність

імовірності фазових координат, яка дорівнює відношенню виду:

$$\omega(y,t) = \frac{\omega^*(y,t)}{P_1(t)}.$$

Приймаючи, що поглинання реалізацій всередині сфероїда S_q^δ для функції поглинання буде пропорційним щільності ймовірності перебування всередині

$$v^*(y,t) = c_2(t)\omega^*(y,t) \tag{7}$$

при $c_2(t) > 0$, що враховує інтенсивність поглинання.

Далі, помістивши (7) у праву частину формули (6), отримаємо:

$$P_1^* = -P_1 \int\limits_{S_q^\delta} c_2(t)\omega(y,t)\,dy. \tag{8}$$

Запишемо отримані залежності (6) та (8) у скороченому вигляді:

$$P_1^* = -P_1\eta(t), \tag{9}$$

а початкову умову зафіксуємо виразом $P_0(t_0) = 1$.

Введена до рівняння (7) функції $\eta(t)$ характеризує поведінку функції поглинання $v^*(y,t)$ всередині сфероїда й на його поверхні. Для характеристики поглинання станів навігації буксирної системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання' на поверхні сфероїда функцію $\eta(t)$ представимо у вигляді:

$$\eta(t) = \int\limits_S \left(n^0\pi(y,t)\right)\partial y,$$

а при поглинанні цих же станів всередині сфероїда функцію $\eta(t)$ перетворимо до вигляду:

$$\eta(t) = \int\limits_{S_q^\delta} \left(c_2(t)\omega(y,t)\right)\partial y,$$

Для розв'язання рівняння (7) при фіксованій початковій умові $P_0(t_0 = 0) = 1$ використаємо залежність:

$$P_1(t) = exp\left[-\int\limits_0^t \eta(t)d\tau\right], \tag{10}$$

отже, імовірність переходу буксирної системи "буксирувальник – сейсмічне обладнання" у небезпечний стан за межі поверхні сфероїда S_q^δ може бути визначено за формулою:

$$P_0(t) = 1 - exp\left[-\int_0^t \eta(t)d\tau\right]. \quad (11)$$

Тому, зафіксувавши значення верхньої границі $P_1(t)$ у формулі (7) або нижньої границі $P_0(t)$ у формулі (10) і задавшись функцією $\eta(t)$, можна визначити часовий інтервал, протягом якого система "буксирувальник – сейсмічне обладнання" буде знаходитись у навігаційній безпеці в границях сфероїда S_q^{δ}, взятого за основу при розробці плану маршруту буксирування. Для рішення завдання щодо забезпечення безпеки навігації буксирної системи "буксирувальник" – "сейсмічне обладнання" за заданими траєкторіями виникає необхідність встановити функцію $\eta(t)$, що залежить від нормованої функції імовірності $\omega(y,t)$, при цьому:

$$\frac{\partial\omega(y,t)}{\partial t} = -div\,\pi(y,t) - v(y,t) + \eta(\tau)\omega(y,t),$$
$$v(y,t) = \frac{v^*(y,t)}{P_0(t)}. \quad (12)$$

Диференціальне рівняння (12), отримане з формули (11) з урахуванням позиції (7), для визначення виду функції $\eta(\tau)$ необхідно проінтегрувати при заданій початковій умові $\omega(y,t_0) = f(y_0)$ й нульових граничних умовах на нескінченності.

Висновки. Таким чином, удосконалено модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання, яка на відміну від відомих, базується на теорії дифузійних процесів взаємодії активаторних сил середовища та інгібіторних сил на буксирній лінії, що забезпечує навігаційну безпеку буксирної системи з маломорехідним об'єктом, траєкторія якого асимптотично прагне до траєкторії буксирувальника, і дозволяє розрахувати ризики переходу буксируємої системи у небезпечний стан навігації із заданою ймовірністю і визначити часовий інтервал, протягом якого дана система буде знаходитись у навігаційній безпеці при розробці плану маршруту буксирування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Технологія видобування нафти. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2022. – 308 с.

2. Polydorides, N., Storteig, E., Lionheart, W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. Ocean Engineering. 2008. Vol. 35, No 14-15. P. 1429–1438.

3. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник / І. О. Ткаченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 114 с.

4. Голиков В. А., Мальцев А. С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. 2007. Вып. 13. С. 58-74.

5. Priyadarshini D., Muhammad J., Mauerman L. Utilizing Skills to Improve Behavior Based Safety. PSJ. 2020. P. 48–52.

6. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса: Феникс, 2010. 229 с.

7. Мальцев А. С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. 2006. Вып. 11. С. 74–86.

8. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений в условиях неопределенности в задачах безопасности мореплавания. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. 2006. Вып. 11. С. 91–107.

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

10. Пипченко А. Д. Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна. Вестник Одесского национального морского университета. 2017. Вып. 2(51). С. 156–164.

11. An M., Wang J., Ruxton T. The development of fuzzy linguistic risk level for analysis of offshore engineering products using approximate reasoning approach. Proceedings of OMAE 2000, the 19th International Conference of offshore mechanics and Arctic Engineering. New Orleans, USA, 2000. P. 321–329.

12. Fossen T. I. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. Norwegian University of Science and Technology, 2005. 28 p.

13. Lataire E., Vantorre M., Delefortrie G. The Influence of the Ship's Speed and Distance to an Arbitrarily Shaped Bank on Bank Effects. 2015. Vol. 11: Prof. Robert F. Beck Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics. DOI: 10.1115/omae2015-41835

14. Антомонов, Ю. Г. Расчёт систем, оптимальных по быстродействию: (Управление судном по курсу) / Ю.Г. Антомонов. – Л. :Судостроение, 1964. – 71 с

15. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

УДК 656.61 (656.62) doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.17

Зазірний А.А.

ВИЗНАЧЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ МІСЦЯ ПОЛОЖЕННЯ СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Мета даного дослідження полягає в опрацюванні можливостей підвищення елементів безпеки плавання судна за недостатньої навігаційної інформації за допомогою нечітких логічних систем. Для цього необхідно дослідити методи контролю розташування судна на основі нечіткої логіки, розробка нового підходу до визначення параметрів вектора стану судна, контролю розташування за допомогою способів теорії нечітких множин; в оцінці параметрів вектора стану судна, що входять до системи з різних джерел. У роботі запропоновано спосіб оцінки за допомогою нечітких чисел. Зазначений спосіб дозволяє оцінювати одночасно декілька параметрів вектора стану судна, а також візуалізувати небезпечні та безпечні параметри.

Отримані дані можна застосувати у системі підтримки прийняття рішень, що згодом стане найважливішим аспектом вибору траєкторії руху судна, тобто безпечного управління судном.

***Ключові слова**. морський транспорт, транспортна система, вантажообіг, безпека, навігаційне обладнання, судноводії, судноплавні компанії, навігаційні аварії, стиснені акваторії, попереднє прокладання шляху, глобальні навігаційні супутникові системи, інформаційне середовище, точність координат, автоматизація, безпека навігації.*

Постановка проблеми. Морський транспорт є важливою складової глобальної транспортної системи та у загальному світовому вантажообігу його частка становить понад 60%. З кожним роком вимоги до морських перевезень стають дедалі жорсткішими. Насамперед, це пов'язано із забезпеченням безпеки. Незважаючи на розвиток навігаційного обладнання та посилення вимог до судноводіїв та судноплавних компаній з боку як ІМО, так і національних відомств, кількість навігаційних аварій, як і раніше, залишається високою. Стиснені акваторії вважаються найбільш небезпечними для плавання судна. Судноводію слід ретельно підходити до процесу виконання попереднього прокладання шляху судна в небезпечних у навігаційному плані місцях [1], а також постійно контролювати місце розташування, особливо в умовах нестачі навігаційної інформації.

Глобальні навігаційні супутникові системи не вирішують всієї повноти навігаційних завдань, що виникають у судноводія. ІМО передбачає вирішити навігаційні проблеми в рамках запровадження загальних масивів інформаційного середовища е-Навігації. Разом з тим окремі випадки навігаційних проблем залишаться в умовах неповноти навігаційної інформації при утриманні судна на маршруті.

Найважливішим завданням судноводіння залишається визначення та контроль місцезнаходження судна та оцінка точності обсервованих координат місця [2]. В умовах, що склалися, автоматизація процесу визначення місцезнаходження судна має велике значення для безпеки навігації.

Сучасні технічні засоби судноводіння перебувають у стадії безперервного вдосконалення. Процеси контролю розташування судна, в тому числі автоматичного, вимагають подальшого дослідження.

Визначення обсервованого розташування судна можливе за візуальними спостереженнями берегових орієнтирів: по двох пеленгах, по трьох пеленгах, по пеленгу та горизонтальному куту. Існують комбіновані методи визначення обсервованого місцеположення судна (ОМС), коли використовується візуальне спостереження орієнтирів та суднові радіолокаційні засоби, наприклад, способи визначення місця по пеленгу та відстані, горизонтальному куту та відстані. Справжня позиція судна може бути також детермінована по небесних світилах, по пеленгах радіомаяків, за допомогою наземних радіонавігаційних систем або за супутниковими радіонавігаційними системам з подальшим прокладанням навігаційних параметрів для контролю обчислення шляху.

Метою статті є підвищення елементів безпеки плавання судна за недостатньої навігаційної інформації**.**

Виклад основного матеріалу. Судноводіння – це наука, яка вивчає умови, засоби та способи водіння суден та складається з таких дисциплін: управління судном, навігація, морехідна астрономія, електронні і технічні засоби судноводіння. Предметом сучасного судноводіння є вибір найвигіднішого шляху руху судна та здійснення його безпечного переходу таким шляхом у встановлений термін [3].

Важливу роль у забезпеченні безпеки мореплавання відіграє проблема безпечного розходження суден. Для вирішення проблеми попередження зіткнень у 1972 р. було прийнято «Конвенцію про міжнародні правила попередження зіткнень суден у морі», додатком якої є Правила МППЗС-72 (МППЗС). Варто зазначити, що МППЗС не враховують навігаційних обмежень у районі плавання, не застосовуються у разі зустрічі кількох суден, тому судноводій не завжди може точно оцінити навігаційну обстановку та зробити правильний вибір для вирішення завдання розходження. Іншими словами, дуже суттєвим є «людський фактор» [3].

«Людський фактор – це психологічні та інші характеристики людини, його можливості, обмеження, що визначаються у конкретних умовах його діяльності, причина нещасного випадку, аварії, пригоди внаслідок неправильних дій людини» [4].

Вирішення проблеми впливу людського фактора на прийняття рішень – це створення автоматизованої системи запобігання зіткнення суден. Головним її призначенням є інформаційна допомога у виконанні завдань судноводіння, що полягає у наданні своєчасних, достатніх, легко інтерпретованих даних, необхідних для прийняття рішень. За останні роки з'явилася велика кількість публікацій, пов'язаних із розглядом та вирішенням даної проблеми [5].

Розгляд простих, фундаментальних положень поняття «безпека» формує у будь-якого фахівця визначення безпечної поведінки. Забезпечення безпечних умов будь-якої діяльності здійснюється при урахуванні всіх без винятку особливостей трудових та виробничих процесів, притаманних конкретній сфері діяльності. Будь-який фахівець повинен мати жорсткі та гнучкі навички [5]. Звідси виникає необхідність їх вивчення в залежності від галузі діяльності та безпосередньо виконуваної роботи.

Для того щоб зрозуміти, чи безпечно працює будь-яка система, її необхідно оцінити. При цьому оцінка безпеки будується на послідовності стадій виділення параметрів у реально існуючих системах, а далі математичної формалізації та формулювання загальної моделі безпеки. Існують різні методи детермінування захищеності системи. У сукупному варіанті вони можуть бути представлені як чотири групи (рис. 1):



Рисунок 1 – Основні методи оцінювання безпеки

Крім ключових методів оцінювання безпеки є значна кількість інших методик, які можна систематизувати наступним чином (рис. 2):

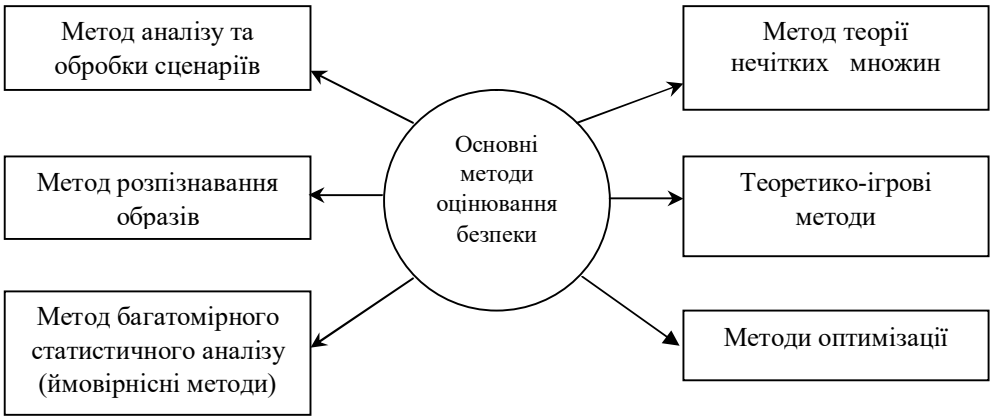


Рисунок 2 – Класифікація методів оцінювання безпеки

Проаналізуємо докладніше кожен метод:

1. Методи багатовимірного аналізу.

Сутність даного методу полягає в переході від первісної ідеї до новіших, попередньо некорельованих компонентів, які мають меншу кількість факторів, що обмежує цілу або дуже ймовірну частку мінливості початкових даних. Це завдання комплексне, але має рішення з використанням методу компонентного аналізу, який відноситься до одного з методів факторного аналізу даних.

2. Теоретико-ігровий метод.

Теоретико-ігровий метод заснований на створенні системи оцінювання «людина-машина». Система використовує великий інтелектуальний потенціал у вигляді програмного та інформаційного забезпечення підтримки прийняття рішень. Метод дозволяє налаштовувати модель системи управління, вносити корективи до бази даних після кожного сеансу гри. Попередником теоретико-ігрового методу були традиційні зустрічі на різних рівнях управління. Відмінні результати отримують при використанні теоретико-ігрових способів, особливо у тих аналізованих випадках, де всі без винятку процеси можуть бути перебудовані в ігри.

3. Методи оптимізації.

Нерідко дані способи застосовуються в аналітичному відображенні досліджуваних процесів з метою генерації кожного підібраного аспекту безпеки. Даний варіант суттєво обмежує сферу застосування критеріїв, якщо описані процеси характеризуються показниками, які не можуть бути кількісно віднесені до простої аналітичної форми.

4. Методи, засновані на теорії нечітких чисел та множин.

Зазначені методи є сучасним апаратом для дослідження та вивчення комплексних, складно формалізованих питань та завдань. Поняття «нечітка множина» було запропоновано видатним ученим Лотфі Заде у 1965 році. Методи дають можливість формалізувати невірні, неідеальні, часто двоїсті поняття та знання, якими користуються експерти при логічних виведеннях, тобто, по суті, є перекладачем комп'ютерної мови на зрозумілу будь-якому фахівцю природну мову.

5. Методи розпізнавання образів.

Методи для ідентифікації предметів, процесів, явищ, ситуацій, також об'єктів, що характеризуються кінцевим набором деяких властивостей і ознак. Конкретна основа ідеї розпізнавання образів складається з набору різних методів: теорії ймовірності, математичної статистики, випадкової теорії взаємозв'язку та теорії ігор.

6. Метод аналізу та обробки сценаріїв.

Сутність методу полягає у тому, що відбувається організація взаємодії досвідчених кадрів, що працюють у різних сферах діяльності, генерації та вирішення комплексних завдань, при цьому використовуючи математичне моделювання.

Як відзначалося, залежно від виду діяльності використовуються конкретні методи оцінювання безпеки. Докладніше розберемо способи, які застосовуються для оцінки безпеки мореплавання. Завданням усієї світової спільноти є забезпечення безпеки. Визначення вирішення зазначеної проблеми безпосередньо пов'язано з оцінкою значень навігаційного ризику та прийняттям рішення про застосування ресурсів для боротьби з навігаційними ризиками. У навігації під цим передбачається обрання найкращих схем маневру з позиції контролю максимальної дистанції від рухомих та нерухомих загроз.

Під безпекою навігації та судноводіння мається на увазі якісна характеристика комплексної організаційно-технічної навігаційної системи, що містить множину підсистем, взаємопов'язаних одна з одною.

Апріорний та апостеріорний методи є основними двома способами оцінювання навігаційної безпеки плавання. Апріорний спосіб полягає у застосуванні математичної моделі руху судна, яка дозволяє оцінити ймовірність виключення відмов у системі мореплавання. Тут під системою мореплавання розуміється комплекс навігаційного, гідрографічного забезпечення та роботи штурманської служби судна.

Апостеріорний (статистичний) метод заснований на обробці статистичних даних, що характеризують навігаційні події, які відбулися із суднами за певний період часу. Щоб повністю оцінити рівень навігаційної безпеки мореплавання необхідно знайти підходи, які б враховували основні властивості організаційно-технічної системи навігації, причому враховуючи різноманітність взаємозв'язків елементів. Властивості навігаційної системи за природою можуть бути стохастичними або визначеними [3].

Оцінка рівня безпеки навігації та судноводіння виконується методами теорії систем у випадку, коли характер елементів системи детермінований [6]. При застосуванні математичних моделей руху враховуються вся сукупність гідродинамічних та механічних сил, які діють на судно. Цей підхід непогано показав себе в оцінці безпечного проходу судна у вузькостях, стиснутих водах, каналами та навколо портових кордонів. Детермінований підхід містить особливість, яка полягає в тому, що випадкові фактори у будь-якому циклі моделювання видаються вже попередньо визначеними, а з наступними циклами модифікуються. Крім наведеного, складно описати модель управління морським об'єктом, що містить стадії оцінки вірності прийняття рішення на виконання маневру, моніторингу та реалізацію команди, при цьому з огляду на можливі невизначеності.

Як видно, способів та методів оцінки безпеки у різних сферах життєдіяльності людини, зокрема, у мореплаванні значна кількість. Для оцінки безпеки необхідно мати базу даних, а саме, параметри руху судна, сили, що діють на судно чи морський плавучий об'єкт. Розглянемо докладніше параметри, що використовуються у судноводінні:

1. Курс морського плавучого об'єкта – двогранний кут між площиною істинного меридіана та діаметральною площиною судна, що відраховується у градусах від північної частини меридіана по ходу годинникової стрілки;

2. Швидкість – одна з найважливіших експлуатаційних характеристик судна, що визначає швидкість його пересування. Швидкість на флоті вимірюється у вузлах (морська миля за годину), кабельтових за хвилину. Існують різні види швидкості судна.

3. Дистанція до небезпеки – найкоротша відстань до об'єкта. У судноводінні одиницею виміру є морські милі та кабельтові;

4. Пеленг – це двогранний кут між напрямком на північ (N істинний) і вертикальною площиною, що проходить через об'єкт, який спостерігається та точку спостереження;

5. Кутова швидкість повороту судна – величина, що характеризує швидкість зміни курсу за одиницю часу навколо центру обертання;

6. Дрейф або знесення судна (XTD) – зміщення судна з лінії шляху під впливом вітру, моря та течії;

7. Кут дрейфу – кут між лінією генерального курсу та курсу, що утворюється при дрейфі. Кут дрейфу при впливі на судно вітру та течії утворюють загальний кут дрейфу;

8. Обороти за хвилину (RPM) – одиниця вимірювання частоти обертання головного двигуна (ГД), а саме кількість повних оборотів ГД одиницю часу;

9. Осад судна – вертикальна відстань від діючої ватерлінії до кіля судна, тобто глибина занурення судна у воду.

Оскільки різні відрізки маршруту руху судна відрізняються будь-якими особливостями в навігаційному, географічному і гідрометеорологічному плані, то оцінка безпеки руху судна має проводитися окремо на кожній ділянці.

Найвідомішими методами оцінювання безпеки мореплавання, оцінки точності розташування є імовірнісні методи. Розглянемо математичну модель апріорної оцінки безпеки плавання судна Імовірність безпеки навігації на відрізку маршруту знаходиться у прямій залежності від ймовірності розташування, що є важливим критерієм. Даний факт дозволяє не допустити посадки судна на мілину або запобігти великому знесенню від генерального курсу та від ймовірності плавання, з тим, щоб уникнути зіткнення з іншими судами, особливо при навігації в протоках, вузькостях або у стиснених судноплавних водах.

Перша з цих ймовірностей залежить від точності та надійності навігаційних приладів, визначення місця розташування судна, а також від діяльності оператора-судноводія. Позначимо її як $P_н$, тоді ймовірність навігації, безпечного від зіткнення з динамічними об'єктами, яка залежить, в першу чергу, від якості управління судном та вміння використовувати всі навігаційні прилади позначимо символом $P_у$. Тоді математична модель безпечної навігації судна або плавучого морського об'єкта записується як:

$$P_{БП} = P_Н \cdot P_у. \quad (1)$$

Існують аналітичні підходи, які представляють поведінку складної системи, наприклад, мережею Байєса. Байєсовська модель вважається орієнтованим графом особливого виду. Вершини графа – головні властиві події, що відображають прояв логічних властивостей системи судноводіння та навігації: стан системи навігаційно-гідрографічних умов, здатність судноводія оцінювати навігаційну обстановку та приймати рішення тощо. Ребра моделі графа складаються з логічних зв'язків між подіями, які представлені у вигляді кон'юнкцій, диз'юнкцій та інверсій. Декомпозиція подій, включених до графу, має здійснюватися до глибини їхньої статистичної відокремленості між собою. Використання генеральних правил алгебри логіки (булевої) дозволяє отримати логічне вираження, в принципі, будь-якої події байєсівської моделі системи навігації.

Перетворення логічної закономірності функціонування досить складної системи судноводіння у функцію ймовірності гарантується застосуванням аксіоматики О.М. Колмогорова [7]. Оцінка безпеки мореплавання може бути здійснена за допомогою способів, заснованих на нечіткій логіці. Для виконання завдання необхідно створити методику, яка може бути реалізована у вигляді системи нечіткого виведення та дозволить визначати рівень безпеки на основі комплексної оцінки.

У загальному випадку критерій безпеки мореплавання (з управління) можна записати у такому вигляді:

$$\mu_{нбп} = \mu_у \cdot \mu_{омс}, \quad (2)$$

де $\mu_{нбп}$ – навігаційна безпека плавання, $\mu_{мс}$ – ступінь приналежності позиції судна щодо справжньої, $\mu_у$ – ступінь безаварійного управління судном.

Необхідно сказати, що при визначенні розташування судна, судноводій отримує обсервовані координати з певними допущеннями, оскільки утворюється фігура похибок. Залежно від кількості оброблюваних навігаційних параметрів дана фігура приймає різну форму. Розташування судна може бути оцінене за формулою (3), на підставі отриманих даних вибудовується вказана фігура похибок.

$$\mu_{омс}(x) = sup\{min(\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_n(x))\}, \quad (3)$$

де $\mu_1(x) - \mu_n(x)$ – ступінь належності навігаційних параметрів; n – індекс НП, що показує порядковий номер. Ступінь приналежності навігаційного параметра можна визначити за формулам, запропонованим у [26].

Управління рухом судна – це складний процес, від якого безпосередньо залежить безпека судна. Керований об'єкт можна описати за допомогою стохастичних рівнянь динаміки:

$$\bar{x}(t) = A(t) \cdot x + B(t) \cdot u; \quad x(t_0) = x_0; \ x_0 \in V, \quad (4)$$

де $A(t)$, $B(t)$ – матриці лінійної нестаціонарної системи; $\bar{x}(t)$ – оцінка вектору стану судна; $x(t) \in R^n$ – вектор стану судна, що включає зовнішній вплив на судно вітру, хвилювання та

течії; $u(t) \in R^n$ – вектор управління судна, складові якого належать кусково-безперервному класу функцій та лімітовані таким:

$$\left|u_j\right| \leq M_j;\ M_j > 0;\quad j = \overline{1,m}\,, \tag{5}$$

де М – максимальна управляюча дія.

Ці обмеження мають такий фізичний зміст. Відхилення на заданому часовому інтервалі координат, викликаного максимальним допустимим управлінням *u(t)*, має бути більше або дорівнювати сумарному відхиленні в кінцевий момент часу, викликаного дією збурення та вільного руху системи. Початкові умови породжують вільний рух, тому для нестійких систем відхилення координат можуть бути значними у кінцевий момент часу. Збільшуючи максимальні значення управлінь (граничні значення M_j, $j = \overline{1,m}$), зростають збурення, для яких можливе переведення системи. Збільшується область початкових, базових умов, за яких система може бути так само переведена у вихідне значення координат

Передбачається, що система (4) повністю керована на проміжку (t_o-t_k) та, відповідно, переводиться на початок координат обмеженим управлінням (5), тобто x_0 належить області керованості *V*.

$$\int_{t_0}^{t_\text{k}} \Phi(t_k,\tau)B(\tau)\,B^T(\tau)\Phi^T(t_k,\tau)d\tau = \int_{t_0}^{t_\text{k}} M_j\,d\tau, \tag{6}$$

де $\Phi(t_k,\tau)$ – фундаментальна матриця розв'язків рівняння (4); *T* – знак транспонування; τ – момент часу; t_0 та t_k – початковий та кінцевий час управління.

Допустимо, що вектор первинних умов $x_i(t_0)$ =(0,…, 0, x_i (t_0), 0, … ,0) містить лише одну ненульову компоненту $x_i(t_0)$. Розглянемо алгоритм створення управління з початкової умови *i*-ої координати.

Матриця управління перетвориться у фігуру взаємопов'язану з фігурою приналежності розташування судна, тому оцінивши вектор стану судна можна безпечно управляти. Таким чином, зазначена фігура приналежності місця є найважливішим показником якісного безаварійного управління.

Висновок. Враховуючи вищевикладене, можна зазначити, що неточна, помилкова інформація може призвести до прийняття неправильного рішення, для забезпечення безпеки судноводіння необхідно проводити безперервну оцінку стану судна, який дозволяє оцінювати одночасно декілька параметрів вектора стану судна, а також візуалізувати небезпечні та безпечні параметри. Отримані дані можна застосувати у системі підтримки прийняття рішень, що згодом стане найважливішим аспектом вибору траєкторії руху судна, тобто безпечного управління судном.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO // Human Element [Internet portal]. URL: https://www.imo.org/en/OurWork/ HumanElement/Pages/Default.aspx.

2. Обертюр К.Л. Повышение безопасности эксплуатации судов методами управления событиями: дис. ... канд.техн. наук 05.22.20 / Обертюр Константин Леонидович. – Одесса, 2015. – 223 с.

3. Дерябін В. В. Модель зчислення шляху судна в умовах впливу зовнішніх факторів [Текст]// Експлуатація морського транспорту. - 2011. - № 1 (63) С. 33-38.

4. Resolution A.817 (19) Performance Standards For Electronic Chart Display And Information Systems (ECDIS) (adopted on 23 November 1995).

5. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр,2005. – 208 с.

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

7. Гнеденко Б.В., Колмогоров А.Н. Предельные распределения для сумм независимых случайных величин.- М.: ГИТТЛ, 1949.-264 с.

Zazirnyi A.A.

DETERMINATION AND CONTROL OF THE LOCATION OF THE VESSEL USING Fuzzy LOGIC

The purpose of this study is to study the possibilities of increasing the safety elements of the ship's navigation with insufficient navigational information using fuzzy logic systems. For this, it is necessary to research the methods of controlling the location of the ship based on fuzzy logic, the development of a new approach to determining the parameters of the state vector of the ship, controlling the location using the methods of fuzzy set theory; in the estimation of the parameters of the ship's state vector, which are included in the system from various sources. The paper proposes a method of estimation using fuzzy numbers. The mentioned method allows to simultaneously evaluate several parameters of the ship's state vector, as well as to visualize dangerous and safe parameters. The obtained data can be applied in the decision support system, which will later become the most important aspect of choosing the trajectory of the ship's movement, that is, the safe management of the ship.

***Key words**. maritime transport, transport system, freight traffic, safety, navigation equipment, shipmasters, shipping companies, navigation accidents, compressed water areas, pre-laying of the path, global navigation satellite systems, information environment, coordinate accuracy, automation, navigation safety*

УДК 629.5 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18

Сагін С.В., Заблоцький Ю.В.

ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Розглянути питання щодо діагностування технічного стану енергетичної установки засобів водного транспорту. Виконаний аналіз проектування та експлуатації енергетичних установок засобів водного транспорту визначивщо їх вдосконалення доцільно вести за наступними напрямками: підвищення стійкості роботи деталей кривошипно-шатунного механізму і підшипників руху; зниження втрат енергії за рахунок підвищення пружнодемпфуючих властивостей мастильного матеріалу, що забезпечує процеси мащення та охолодження вузлів дизеля валу та лінії валопроводу; мінімізації гідравлічних втрат і контактних навантажень у паливній апаратурі високого тиску; розвитку методів діагностики технічного стану вузлів і деталей дизеля, а також функціональних характеристик робочих рідин, що забезпечують отримання корисної роботи. Підтвердженням цього стали результати випробувань, що виконувались на суднових дизелях 6EY22AW та полягали в вимірюванні механічного коефіцієнта корисної дії на різних режимах роботи (що відповідають 35-ти, 50-ти, 65-ти і 80-ти %-ому навантаженню) за різної інтенсивності поповнення системи мащення (через кожні 100 годин роботи, через кожні 25 годин роботи та через кожні 10 годин роботи) та за різних варіантах додавання

поверхнево активних речовин до моторного мастила. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що зниження механічних втрат дизеля пропорційне зростанню його механічного коефіцієнту корисної дії. Цей параметр під час роботи дизеля 6EY22AW фірми Yanmar з рекомендованою фірмою-виробником інтенсивністю доливання моторного мастила в циркуляційну систему мащення та без додаткового додавання поверхнево-активних речовин до об'єму моторного мастила в діапазоні навантаження 35…80 % від номінального навантаження знаходиться в межах 0,722…0,842. Вибір оптимального режиму поповнення циркуляційної системи, а також додавання в загальний обсяг циркуляційної системи поверхнево-активної речовини з оптимальною концентрацією сприяє 9,62…14,62 %-ому збільшенню механічного коефіцієнту корисної дії дизеля та відповідному зменшенню його механічних втрат. Одночасно з цим були виконані дослідження з визначення вмісту металевих домішок, що потрапляють в моторне мастило циркуляційної системи мащення та загального лужного числа мастила на протязі 1000-ти годинної експлуатації дизелів. При цьому було визначено, що експлуатаційним умовам, під час яких спостерігається найбільші значення механічного коефіцієнту корисної дії відповідають випадки найменшого вмісту в мастилі металевих домішок та найбільших значень остаточного лужного числа мастила.

Ключові слова: аналіз, діагностування, загальне лужне число, засоби водного транспорту, коефіцієнт корисної дії, контроль технічного стану, методи контролю, моторне мастило, система мащення, суднова енергетична установка, технічний стан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Енергетичні установки засобів водного транспорту є багатокомпонентними структурними об'єктами, при цьому:

- їх функціонування починається з прийому на борт судна робочих рідин (палива, мастила, води) [1, 2];
- їх основним експлуатаційним завданням є перетворення потенційної енергії робочих рідин на корисну роботу, що забезпечує або рух судна, або вироблення теплової та електричної енергії [3, 4];
- завершальним етапом їх виробничого циклу є видалення відпрацьованих газів і охолоджувальних рідин у довкілля [5, 6].

При цьому необхідно забезпечувати не тільки вимоги щодо отримання ефективної потужності і підтримки екологічних параметрів, але й мінімальний рівень втрат енергії під час перетворення вхідної енергії на корисну роботу [7, 8]. Системами, які сприяють цьому, є системи мащення, які за своїм призначенням та функціюванням поділяють на циркуляційні та циліндрові [9, 10].

Енергетичні установки засобів водного транспорту виконують функції головних (в разі використання їх потужності для забезпечення руху судна) та допоміжних (в випадку, коли їх потужність споживається електродвигунами суднового обладнання [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Конструкційні та технологічні заходи, що забезпечують зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння, розглядалися в різних роботах. При цьому увага приділялася модифікації поверхонь циліндро-поршневої групи [13, 14], забезпеченню мінімальної витрати палива [15, 16] і властивостей робочих поверхонь основних елементів дизеля [17, 18].

Аналіз досвіду проектування та експлуатації суднових пропульсивних комплексів, що забезпечують мінімальний рівень необертових втрат, показує, що їх вдосконалення доцільно вести за наступними напрямками:

- підвищення стійкості роботи деталей кривошипно-шатунного механізму (КШМ) і підшипників руху [19, 20];
- зниження втрат енергії за рахунок підвищення пружнодемпфуючих властивостей мастильного матеріалу, що забезпечує процеси мащення та охолодження КШМ і підшипників ковзання, а також працездатний стан колінчатого валу [21, 22];

- мінімізації гідравлічних втрат і контактних навантажень у паливній апаратурі високого тиску [23, 24];
- розвитку методів діагностики технічного стану вузлів і деталей дизеля, а також функціональних характеристик робочих рідин, що забезпечують отримання корисної роботи [25, 26].

Найбільшим доступним в умовах експлуатації вже існуючого енергетичного обладнання є оптимізація роботи циркуляційних систем мащення.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті була розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Технічний стан та експлуатаційні показники роботи суднових енергетичних установок визначаються ефективністю роботи систем мащення, які забезпечують мінімальний рівень втрат енергії під час її передачі до споживачів. Підвищення ефективності роботи систем мащення досягається різними шляхами [27, 28]. З цілого ряду методів, що є найбільш прийнятними для енергетичних установок засобів водного транспорту умов (з технологічної та фінансової точки зору), є використання оптимального доливання мастила в систему та застосування поверхнево активних речовин (ПАР) [29, 30].

Вплив інтенсивності доливання моторного мастила в загальний об'єм циркуляційної системи мащення на механічні втрати енергії можливо оцінити за зміною механічного коефіцієнту корисної дії (ККД) дизеля для різних умов експлуатації (різних умов поповнення системи мащення свіжим мастилом). Для цього виконувалось вимірювання механічного ККД на різних режимах роботи дизелів 6EY22AW (що відповідають 35-ти, 50-ти, 65-ти і 80-ти %-ому навантаженню) за різної інтенсивності поповнення системи мащення:

- 1-ий дизель – через кожні 100 годин роботи;
- 2-ий – через кожні 25 годин роботи№
- 3-ий – через кожні 10 годин роботи.

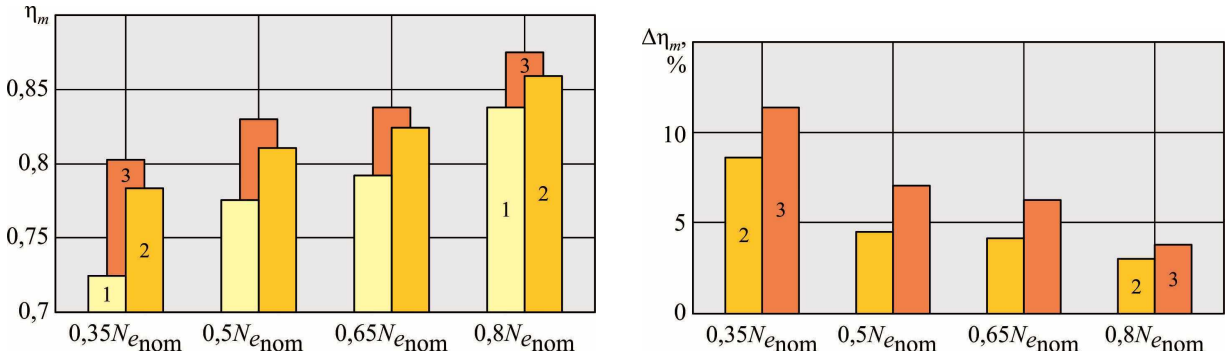
На кожному з досліджуваних режимів ($0{,}35N_{e\text{nom}}$, $0{,}5N_{e\text{nom}}$, $0{,}65N_{e\text{nom}}$, $0{,}8N_{e\text{nom}}$, де $N_{e\text{nom}}$ – номінальне навантаження) дизелі експлуатувалися рівний проміжок часу, який залежно від навантаження суднової електростанції становив 1,5...2,5 години. Зміна навантаження на двигуни за цей час не перевищувало ±2,5 %, а отриманий масив значень механічного ККД дозволяв із високою точністю визначити його середнє значення [31].

У результаті були отримані значення, узагальнені у вигляді таблиці 1, за результатами якої побудована діаграма, що наведена на рис. 1.

Таблиця 1 – Механічний ККД та відносне збільшення механічного ККД, %, суднових дизелів 6EY22AW фірми Yanmar за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Навантаження на двигун			
	$0{,}35N_{e\text{nom}}$	$0{,}5N_{e\text{nom}}$	$0{,}65N_{e\text{nom}}$	$0{,}8N_{e\text{nom}}$
Двигун № 1 (поповнення через 100 годин)	0,722 / –	0,776 / –	0,793 / –	0,842 / –
Двигун № 2 (поповнення через 25 годин)	0,786 / 8,86	0,812 / 4,64	0,828 / 4,41	0,868 / 3,09
Двигун № 3(поповнення через 10 годин)	0,803 / 11,22	0,831 / 7,09	0,842 / 6,18	0,874 / 3,80

Відносне збільшення механічного ККД, значення якого наведені в табл. 1, визначалось за виразами $\Delta\eta = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta} \cdot 100\%$ – для двигуна № 2 та $\Delta\eta = \frac{\eta_3 - \eta_1}{\eta} \cdot 100\%$ – для двигуна № 3, де η_1, η_2, η_3 – механічний ККД відповідних дизелів.



а) *б*)

Рисунок 1 – Зміна механічного ККД (*а*) та відносне збільшення механічного ККД (*б*) суднових дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила: 1 – через 100 годин; 2 – через 25 годин; 3 – через 10 годин

Наведені в таблиці 1 і на рис. 1 результати підтверджують зниження втрат енергії під час скорочення часу між доливанням мастила в обсяг циркуляційної системи.

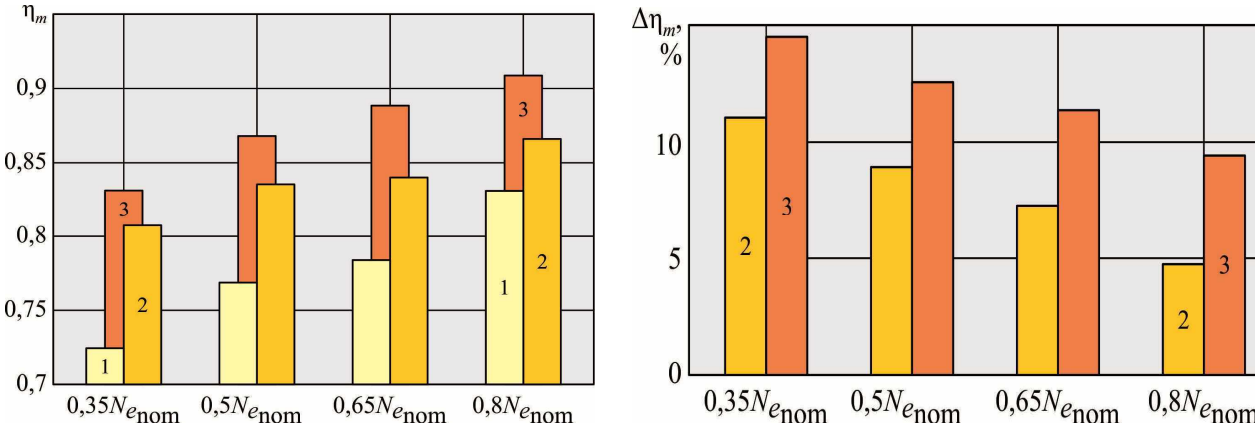
Для визначення впливу ПАР на втрати енергії суднових середньообертових дизелів експерименти отримали наступне продовження [32, 33]. Як і в попередній серії експериментів, дизелі експлуатувалися на рівновеликому навантаженні (250...750)±(15...45) кВт, однакову кількість часу 12...15 годин/добу.

Технологічна послідовність проведення експериментів полягала в наступному. Перший дизель був «контрольним», і після заміни мастила в його системі мащення інших технічних заходів з ним не проводилося, і відповідно до вимог заводу-виробника його експлуатація здійснювалася протягом 100 годин роботи без проміжного поповнення мастила в системі. За цей період експлуатації кількість мастила в циркуляційній системі дизеля не знижувалась нижче гранично допустимого значення. При цьому в циркуляційній системі з точністю ±(2,5...3) % підтримувалися постійний тиск і температура мастила. Система мащення другого дизеля поповнювалася свіжим мастилом через кожні 10 годин роботи до верхнього рекомендованого в картері дизеля, що відповідало максимально можливому обсягу мастила в системі. Даний період поповнення було визначено в якості оптимального під час проведення попередніх експериментів. Система мащення третього дизеля спочатку заповнювалася мастилом з ПАР, що містить у своєму складі солі міді. Оптимальна концентрація ПАР становила 0,1 % від обсягу мастила в системі мащення і була встановлена за допомогою попередніх оптичних і триботехнічних досліджень [34, 35]. Крім того, через кожні 10 годин роботи здійснювалося поповнення циркуляційної системи мащення даного дизеля мастилом з такою ж концентрацією ПАР [36, 37].

Аналогічно попередній серії експериментів, для кожного дизеля в діапазоні навантажень $(0,35...0,8)N_{e\text{nom}}$ виконувалося визначення механічного ККД. Результати цих експериментів наведені в табл. 2 та надані на рис. 2.

Таблиця 2 – Механічний ККД та відносне збільшення механічного ККД, %, суднових дизелів 6EY22AW фірми Yanmar за різних умов експлуатації

Умови експлуатації	Навантаження на двигун			
	$0,35N_{e\text{nom}}$	$0,5N_{e\text{nom}}$	$0,65N_{e\text{nom}}$	$0,8N_{e\text{nom}}$
Поповнення через 100 годин	0,726 / –	0,771 / –	0,789 / –	0,832 / –
Поповнення через 10 годин	0,808 / 11,29	0,841 / 9,08	0,847 / 7,35	0,872 / 4,81
Поповнення через 10 годин та додавання ПАР	0,834 / 14,88	0,871 / 12,97	0,881 / 11,66	0,912 / 9,62



а) *б*)

Рисунок 2 – Зміна механічного ККД (*а*) та відносне збільшення механічного ККД (*б*) суднових дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила: 1 – робота системи мащення в штатному режимі; 2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи; 3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і додавання ПАР

З метою діагностування технічного стану дизеля виконувався аналіз моторного мастила, яке використовувалось в системі циркуляційного мащення дизелів. При цьому в судновій лабораторії фірми Unitor визначались значення вмісту в мастилі металевих домішок, Fe, ppm, та залишкового лужного числа, BN, мгKOH/г. За вмістом металевих домішок Fe, ppm, у мастилі, що відпрацювало, можливо оцінити рівень втрат енергії під час поступального руху в парах тертя поршневе кільце – циліндрова втулка та вкладиш підшипника – колінчатий вал. Чим вище значення Fe у відпрацьованому мастилі, тим більше знос цих пар тертя, а отже більше як контактні взаємодії, так і втрати енергії.

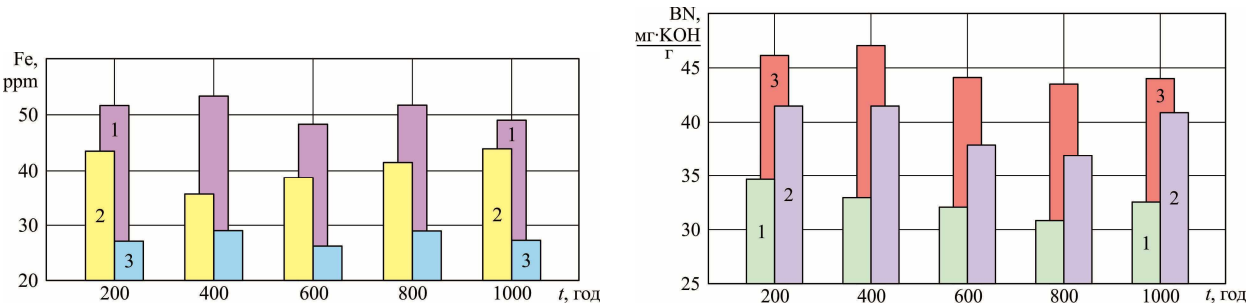
Значення залишкового лужного числа BN, мгKOH/г, характеризує (зокрема) гідравлічну щільність трибологічної системи поршневе кільце – мастильний шар – циліндрова втулка. Чим вище цей показник, тим менша частина газів, що утворюються в циліндрі під час згоряння палива, проходить по дзеркалу втулки циліндрової через можливі нещільності між поршневими кільцями та циліндровою втулкою. Таким чином, у циліндрі разом з паливом згоряє менша частина мастила, що знаходиться лише над верхнім / верхніми поршневими кільцями.

Результати виконаних досліджень наведено в табл. 3 та на рис. 3. Визначення значень вмісту в мастилі металевих домішок та залишкового лужного числа виконувалось для різних навантажень суднових дизелів, що відповідали 0,35$N_{e\text{nom}}$, 0,5$N_{e\text{nom}}$, 0,65$N_{e\text{nom}}$, 0,8$N_{e\text{nom}}$. При цьому в зв'язку зі збігом цих значень в табл. 3 та на рис. 3 наведені результати випробувань, що відповідають експлуатаційному режиму 0,8$N_{e\text{nom}}$.

Таблиця 3 – Результати експерименту

Показник	Час експлуатації, години														
	200			400			600			800			1000		
	1	2	3	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Вміст металевих домішок у відпрацьованому мастилі, Fe, ppm	52	43	28	53	36	29	48	39	26	52	42	29	49	44	28
Залишкове лужне число, BN, мгKOH/г мастила	46	41	34	47	42	33	44	38	32	43	36	31	44	41	33

Примітка: 1 – робота системи мащення в штатному режимі; 2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи; 3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і додавання ПАР



а) *б*)

Рис. 3. Зміна вмісту металевих домішок (*а*) та залишкового лужного числа (*б*) у відпрацьованому мастилі суднових дизеля 6EY22AW фірми Yanmar за різної інтенсивності доливання мастила:
1 – робота системи мащення в штатному режимі;
2 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи;
3 – поповнення системи мащення через 10 годин роботи і додавання ПАР

Зіставлення результатів, що наведені в табл. 1-3, свідчать, що випадкам найбільшого значення механічного ККД відповідають випадку найменшого вмісту в мастилі металевих домішок та найбільших значень остаточного лужного числа мастила.

Висновки. На підставі виконаних досліджень визначимо наступне.

1. Із цілого ряду методів зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях найбільш прийнятними для суднових умов (з технологічної та фінансової точки зору) є використання оптимального доливання мастила в систему циркуляційного мащення та використання поверхнево активних речовин. Перший (доливання мастила) рекомендовано заводом-виготовлювачем, але, як правило, розроблено для номінального режиму роботи дизеля за умови його експлуатації за стандартних умов. Другий (використання поверхнево активних речовин) не має широкого розповсюдження через необхідність додаткових досліджень та розробки спеціальних рекомендацій, що враховують особливості експлуатації дизелів на різних експлуатаційних режимах, а також у випадках зміни одного сорту палива на інший.

2. Діагностування зниження механічних втрат в суднових дизелях можливо за оцінкою його механічного ККД. Цей параметр під час роботи дизеля 6EY22AW фірми Yanmar з рекомендованою фірмою-виробником інтенсивністю доливання моторного мастила в циркуляційну систему мащення та без додаткового додавання ПАР до об’єму моторного мастила в діапазоні навантаження $(0{,}35…0{,}8)N_{e\text{ном}}$ знаходиться в межах 0,722…0,842. Вибір оптимального режиму поповнення циркуляційної системи, а також додавання в загальний обсяг циркуляційної системи ПАР з оптимальною концентрацією (визначення якої здійснюється попередніми лабораторними дослідженнями), сприяє збільшенню механічного ККД дизеля до рівня 0,834…0,912 та відповідному зниженню механічних втрат та збільшенню ефективної потужності. При оптимальному поповненні циркуляційної системи (яке відповідно до експериментальних досліджень складає 10 годин) та додаванням до обсягу циркуляційної системи мащення ПАР (з оптимальною концентрацією 0,1 % за загальним обсягом системи) можливо досягнення 9,62…14,62 %-е збільшення механічного ККД дизеля та відповідне зменшення його механічних втрат.

3. Діагностування втрати енергії, що виникають при зворотно-поступальному русі у вузлах тертя суднових двигунів внутрішнього згоряння (зокрема при переміщенні поршня в циліндрі), та обертального руху колінчатого валу в мотильових та рамових підшипниках може бути виконано за характеристиками відпрацьованого мастила, взятого з його картеру. При

цьому як критерій доцільно використовувати вміст металевих домішок у відпрацьованому мастилі та його залишкове лужне число. Збільшення вмісту механічних домішок свідчить про підвищення рівня контактних взаємодій у парі тертя поршневі кільця – втулка циліндра та колінчатий вал – вкладиш підшипника та зростання втрат енергії. Значення залишкового лужного числа мастила, що використовується для змащування циліндропоршневої групи дизеля, може характеризувати гідравлічну щільність трибологічної системи поршневе кільце – мастильний шар – циліндрова втулка. При цьому великим значенням залишкового лужного числа мастила відповідає більша гідравлічна щільність і менші значення мінімально неминучих втрат енергії.

4. Експериментально встановлено взаємозв'язок між механічним ККД дизеля та характеристиками мастила, що використовується в його системі циркуляційного мащення. Експлуатаційним умовам, під час яких спостерігається найбільші значення механічного ККД відповідають випадки найменшого вмісту в мастилі металевих домішок та найбільших значень остаточного лужного числа мастила.

5. Визначення механічного ККД суднових дизелів потребує значно меншого часу на виконання в порівнянні з методами діагностування технічного стану під час яких виконується аналіз моторного мастила. Тому саме метод визначення механічного ККД рекомендується для діагностування технічного стану енергетичних установок засобів водного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов 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. 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.

3. Мельник О.М., Онищенко О.А., Парменова Д.Г. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

4. 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.

5. Тимощук 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.

6. 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.

7. 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.

8. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera 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.

9. 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.

10. 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.

11. Майданевич С.Б., Тимощук 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.

12. 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.

13. Тимощук 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.

14. 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.

15. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорта 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. 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.

17. Звєрьков 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. Кривий М.О., Сагін С.В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24

20. 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.

21. 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.

22. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

24. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

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.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.

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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – С. 84-103.

33. 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.

34. 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.

35. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78-88.

36. 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.

37. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

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. 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.

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. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera 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.

9. 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.

10. 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.

11. Maydanevich S.B., Tymoshchuk O. Subjects and principles of the international maritime low // Water transport. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

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., 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.

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. Kryvyi M. O., Sagin S. V. Determination of the influence of properties of engine oils on pressure distribution in friction pairs of marine diesel engines// Ship power plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24.

20. 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.

21. 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.

22. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Analysis of operational characteristics of motor oils of marine diesels // Ship power plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

23. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines using lube oils with different structural characteristics // Automation of ship technical facilities. – 2021. – Vol. 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

24. Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine medium-speed diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

25. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // Automation of ship technical facilities. – 2018. – Vol. 24. – P. 72-80.

26. 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.

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.

28. 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.

29. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship technical facilities. – 2014. – Vol. 20. – P. 74-83.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V O Determination of tribological characteristics of surfaces based on the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. –C. 78-88.

36. 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.

37. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELEMENTS OF THE MAIN POWER PLANT OF WATER TRANSPORT

Consider the issue of diagnosing the technical condition of the power plant of water transport. The performed analysis of the design and operation of power plants of water transport means determined that their improvement should be carried out in the following directions: increasing the stability of the work of the parts of the crank-connecting mechanism and the motion bearings; reduction of energy losses due to the increase of elastic damping properties of the lubricant, which ensures lubrication and cooling of the diesel components of the shaft and the shaft line; minimization of hydraulic losses and contact loads in high-pressure fuel equipment; development of methods for diagnosing the technical condition of diesel engine components and parts, as well as the functional characteristics of working fluids that ensure useful work. This was confirmed by the results of tests performed on 6EY22AW marine diesel engines, which consisted in measuring the mechanical efficiency coefficient at different operating modes (corresponding to 35, 50, 65 and 80% load) at different intensities replenishment of the lubrication system (after every 100 hours of operation, after every 25 hours of operation and after every 10 hours of operation) and according to various options of adding surface-active substances to engine oil. As a result of experimental studies, it was established that the reduction of mechanical losses of a diesel engine is proportional to the increase of its mechanical efficiency. This parameter during the operation of the Yanmar 6EY22AW diesel engine with the intensity of adding motor oil to the circulation lubrication system recommended by the manufacturer and without additional addition of surfactants to the volume of motor oil in the load range of 35...80% of the nominal load is within 0.722 ...0.842. The choice of the optimal mode of replenishment of the circulation system, as well as the addition of a surfactant with an optimal concentration to the total volume of the circulation system contributes to a 9.62-14.62% increase in the mechanical efficiency of the diesel engine and a corresponding reduction in its mechanical losses. At the same time, studies were carried out to determine the content of metal impurities entering the engine oil of the circulating lubrication system and the total alkalinity of the oil during 1,000 hours of diesel engine operation. At the same time, it was determined that the operating conditions, during which the highest values of the mechanical coefficient of useful action are observed, correspond to the cases of the lowest content of metal impurities in the lubricant and the highest values of the final alkaline number of the lubricant.

***Key words**: analysis, diagnosis, total alkalinity, water transport means, efficiency factor, technical condition control, control methods, engine oil, lubrication system, ship power plant, technical condition*

УДК 629.5 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19

Сагін С.В., Бондар С.А.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Розглянути питання щодо розробки методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Визначено, що експлуатація пропульсивних комплексів засобів водного транспорту пов'язана з забезпеченням надійності, безвідмовності та належного технічного стану всіх його складових – корпусу судна, головного

двигуна та гребного гвинта. При цьому найбільша увага приділяється саме головної енергетичної установки, саме від її здатності виконувати функції з перетворення енергії палива на обертальних рух валу та з'єднаного з ним гребного гвинта залежать швидкісні та маневрові характеристики судна. Навіть тимчасова відсутність здатності головної енергетичної установки забезпечувати рух судна може призвести до необертових наслідків та стати причиною виникнення аварій, забруднення довкілля, втрати вантажу, зіткнення суден, нанесення шкоди судновому екіпажу. Зазначено, що критерії оцінки виникнення аварійних події ґрунтуються на суворо встановлених рівнях ризику. Ідентифікація ризиків виконується виходячи з аналізу небезпек, пов'язаних з потоком відмов механізмів в зазначений період експлуатації. Така ідентифікація була виконана шляхом збору, обробки та аналізу статистичних даних машинних журналів з експлуатації головної енергетичної установки судна класу «річка-мор» за п'ятнадцятирічний період експлуатації. Збір та обробка статистичних даних проводилась для наступних інтервалів – 1…5 років, 5…10 років, 10…15 років, причому на протязі всього зазначеного часу головна енергетична установка експлуатувалася за системою безперервного технічного обслуговування. Аналіз отриманої інформації дозволив розрахувати значення параметру потоку відмов суднового середньообертового дизеля Wärtsilä 6R32BC, який виконував функції головного двигуна на судні дедвейтом 6450 тонн. Були визначені значення потоку відмов; градації вірогідності виникнення ризику та витрат, що пов'язані з їх усуненням, а також розраховані матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю. Саме розрахунок матриць розподілення вірогідності ризиків пропонується як метод діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

Ключові слова: безвідмовність, вірогідність виникнення ризику, головна енергетична установка, діагностування, засоби водного транспорту, метод, надійність, оцінка ризику, ризик, технічне обслуговування, технічний стан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Експлуатація пропульсивних комплексів засобів водного транспорту пов'язана з забезпеченням надійності, безвідмовності та належного технічного стану всіх його складових – корпусу судна, головного двигуна та гребного гвинта [1, 2]. При цьому найбільша увага приділяється саме головної енергетичної установки, саме від її здатності виконувати функції з перетворення енергії палива на обертальних рух валу та з'єднаного з ним гребного гвинта залежать швидкісні та маневрові характеристики судна [3, 4]. Навіть тимчасова відсутність здатності головної енергетичної установки забезпечувати рух судна може призвести до необертових наслідків та стати причиною виникнення аварій [5, 6] забруднення довкілля [7, 8], втрати вантажу [9, 10], зіткнення суден [11, 12], нанесення шкоди судновому екіпажу [13, 14].

Безпечна експлуатація засобів водного транспорту знаходиться під постійним контролем та регулюванням класифікаційних товариств, національних та міжнародних організації, діяльність яких спрямована на судноплавство та морські перевезення. Одним з документів, що розроблено та прийнято Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization – IMO), є Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганням забруднення (International Safety Management Code – ISM Code), головна мета якого – забезпечення безпеки на морі, запобігання нещасним випадкам або загибелі людей та уникнення заподіяння шкоди навколишньому природному середовищу, зокрема морському середовищу та майну. ISM Code визначає обов'язки судноплавних компаній з організації технічного обслуговування суднових технічних засобів. Також Комітетом безпеки на морі та Комітетом захисту морського навколишнього середовища IMO затверджено «Посібник з формальної оцінки безпеки» (Formal Safety Assessment – FSA), яке може бути використане для формалізованої оцінки безпеки різних технічних та експлуатаційних рішень. Впровадження стандартів управління безпечної експлуатації суден та запобігання забрудненню, що визначені

ISM Code, посилило вимоги щодо забезпечення безпеки на морі. Відповідно до положень Глави IX Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS-74), дії будь-якої компанії, що здійснює діяльність у галузі торговельного мореплавання, та її методи управління на судні повинні здійснюватися на основі схваленої Адміністрацією системи управління безпекою (Safety Management System – SMS). Кожне судно має бути оглянуте Адміністрацією прапора з видачею відповідного сертифіката (свідоцтво про управління безпекою). Поряд з багатьма вимогами до SMS вона повинна включати процедури, що забезпечують передачу повідомлень адміністрації керуючої компанії про випадки недотримання вимог, нещасні випадки та небезпечні ситуації, їх розслідування та аналіз з метою вдосконалення безпеки. Компанія, у свою чергу, має встановити процедури дій щодо усунення виявлених недоліків. При цьому процедури та керівні принципи повинні тлумачитися у поєднанні з іншими процедурами, що містяться у документації щодо SMS.

Інструменти FSA та SMS засновані на завчасних діях та уявляє з себе структурований метод, що дозволяє визначити потенційно небезпечні ситуації заздалегідь, до виникнення аварій з тим, щоб після цього оцінити величину ризику, провести оцінку витрат, що пов’язані з використанням можливих варіантів управління ризиками та на підставі системного аналізу прийняти обґрунтовані рішення з зниження величини ризику [3, 15, 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пропульсивні комплекси засобів водного транспорту суден поєднають між собою головну енергетичну установку, гребний гвинт та корпус судна, тому відмова або виникнення ризику в однієї з цих складових призводить до аварійного режиму експлуатації всього судна, що становить небезпеку як під час стоянки судна в порту, також під час виконання їм навігаційного переходу [4, 17].

Оцінка технічного стану будь яких енергетичних об’єктів, що входять до пропульсивного комплексу суден морського та внутрішнього водного транспорту є актуальним завданням в зв’язку з тим, що за її допомогою забезпечується прогнозування надійності роботи судна, головних двигунів та допоміжних установок [8, 18, 19]. Оцінка технічного стану суднових дизелів (головних та допоміжних) виконуються шляхом безпосереднього спостереження за їх роботою та контролю їх основних експлуатаційних показників, шляхом діагностування їх технічного стану, а також за допомогою аналізу статистичних даних з їх попередньої експлуатації [3, 20]. При цьому визначаються показники безвідмовності за гарантований час експлуатації, довговічності в умовах підвищених теплових та динамічних навантажень, ремонтопридатності за умов експлуатації судна, збереження на протязі всієї експлуатації [21, 22].

Під час експлуатації пропульсивних комплексів з напрацюванням, що наближається до нормативного терміну, тобто з малим остаточним ресурсом, особливе значення набуває якість технічної експлуатації. При цьому переважне значення набуває метод технічного обслуговування, який судновласник має намір застосувати на судне до моменту його списання (час до якого може досягати десяти років), що дозволить забезпечити на період експлуатації, що залишився, скорочення простоїв, безпеку роботи, а також дозволить спрогнозувати витрати на технічне обслуговування та ремонт [23, 24].

Критерії оцінки виникнення аварійних події ґрунтуються на суворо встановлених рівнях ризику. Якщо ризик знаходиться у прийнятній зоні, то немає потреби вживати якихось дії для зменшення ступеню ризику, а саме мінімізувати фактори ризику та їх наслідки (технічні або економічні) [25, 26]. Ідентифікація ризиків виконується виходячи з аналізу небезпек, пов’язаних з потоком відмов механізмів в зазначений період експлуатації.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті була розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту, який дозволяє визначити вірогідність виникнення ризику аварійного стану суднового дизелю з підвищеним терміном експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Досягнення поставленої цілі здійснювалось шляхом коригування оптимального методу технічного обслуговування для конкретної групи суден, що

знаходяться в технічному менеджменті малих судноплавних компаній і часто відчувають брак фінансування на придбання змінно-запасних частин для суднових енергетичних установок [27, 28]. Для розв'язання цього завдання збиралися та оброблялися статистичні дані машинних журналів з експлуатації головної енергетичної установки судна класу «річка-мор» за п'ятнадцятирічний період експлуатації. Збір та обробка статистичних даних проводилась для наступних інтервалів – 1…5 років, 5…10 років, 10…15 років, причому зазначимо, що на протязі всього зазначеного часу головна енергетична установка експлуатувалася за системою безперервного технічного обслуговування, що відповідало вимогам ISM-Code [9, 11, 29]. Аналіз отриманої інформації дозволив розрахувати значення параметру потоку відмов суднового середньообертового дизеля Wärtsilä 6R32BC, який виконував функції головного двигуна на судні дедвейтом 6450 тонн.

Як основні елементи, відмови яких можуть привести до виникнення небезпечних або аварійних ситуацій були обрані наступні: форсунки, з'єднання та ущільнення, паливні насоси високого тиску, трубопроводи високого тиску, регулятор частоти обертання, розподільний вал, охолоджувач мастила, мотильові підшипники, охолоджувач повітря, системи підготовки палива, клапани системи розподілення газів, циліндрові кришки, поршні та поршневі кільця, циліндрові втулки, газотурбонагнетач, редуктор, рамові підшипники, упорний підшипник (далі на рис. 1, 2 ці елементи позначені від 1 до 18).

Для кожного з вказаних елементів дизеля розраховувалось значення параметру потоку відмов

$$\omega_{\text{і}}(t_i) = \frac{\sum n_i}{t_i} \cdot 100\%;$$

де $\omega_i(t_i)$ – параметр потоку відмов i-го елемента дизеля за час експлуатації в i-ому циклі;

Σn_i – кількість відмов та планових замін обраного елементу дизеля за час експлуатації в i-ому циклі;

t_i – тривалість експлуатації в i-ому циклі.

Величина загального параметра потоку відмов за весь експлуатаційний цикл $\omega_\Sigma(t_i)$, визначається за виразом

$$\omega_\Sigma(t_i) = \sum_1^i \left(\omega_i(t_i) \frac{\sqrt[i+1]{i}}{i^i} \right);$$

де i – цикл проведення вимірювань.

Тоді, для розглянутого періоду експлуатації та трьох циклів визначення $\omega_i(t_i)$ (що відповідають 1…5, 6…10, 11…15 рокам), отримаємо вираз

$$\omega_\Sigma(t_i) = \omega_1(t_i) + \omega_2(t_i)\frac{\sqrt[3]{2}}{2^2} + \omega_3(t_i)\frac{\sqrt[4]{3}}{3^3};$$

де $\omega_1(t_i)$, $\omega_2(t_i)$, $\omega_3(t_i)$ – параметр потоку відмов i-го елементу під час 1-го, 2-го та 3-го циклу експлуатації.

Результати розрахунків параметра потоку відмов наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Визначення параметру потоку відмов за різний експлуатаційний період головної енергетичної установки судна дедвейтом 6450 тонн

Елемент, що контролюється	Параметр потоку відмов, %, за різний експлуатаційний період			Параметр потоку відмов за весь період, %
	1…5 років	5…10 років	10…15 років	
1. Форсунки	0,082	0,091	0,101	0,123
2. З'єднання та ущільнення	0,063	0,077	0,079	0,080
3. Паливні насоси високого тиску	0,042	0,047	0,055	0,058
4. Трубопроводи високого тиску	0,027	0,034	0,037	0,038
5. Регулятор частоти обертання	0,023	0,024	0,027	0,028
6. Розподільний вал	0,017	0,020	0,018	0,018
7. Охолоджувач мастила	0,016	0,017	0,017	0,017
8. Мотильові підшипники	0,033	0,034	0,041	0,042
9. Охолоджувач повітря	0,017	0,010	0,018	0,018
10. Системи підготовки палива	0,011	0,012	0,012	0,013
11. Клапани системи розподілення газів	0,011	0,011	0,013	0,014
12. Циліндрові кришки	0,016	0,018	0,021	0,022
13. Поршні та поршневі кільця	0,013	0,017	0,019	0,020
14. Циліндрові втулки	0,011	0,007	0,015	0,017
15. Газотурбонагнетач	0,006	0,004	0,008	0,009
16. Редуктор	0,009	0,008	0,010	0,011
17. Рамові підшипники	0,004	0,003	0,005	0,006
18. Упорний підшипник	0,021	0,019	0,022	0,024

На підставі даних, що наведені в табл. 1, були побудовані номограми, які подані на рис. 1, а також були розраховані матриці ризику, за який приймалось розподілення вірогідності виникнення відмови елементів суднового дизелю [11, 30, 31]. При цьому градації вірогідності виникнення ризику R та градації витрат C на усунення наслідків відмов, що пов'язані з аварійними ситуаціями визначались відповідно до табл. 2 в залежності від щільності вірогідності виникнення ризику

$$f = \frac{q(\delta t)}{N};$$

де $q(\delta t)$ – кількість відмов за проміжок часу δt в який елемент, що контролюється знаходився в експлуатації;

N – кількість всіх однотипних елементів, що входять до досліджуваної множини;

та вартості усунення наслідків відмов.

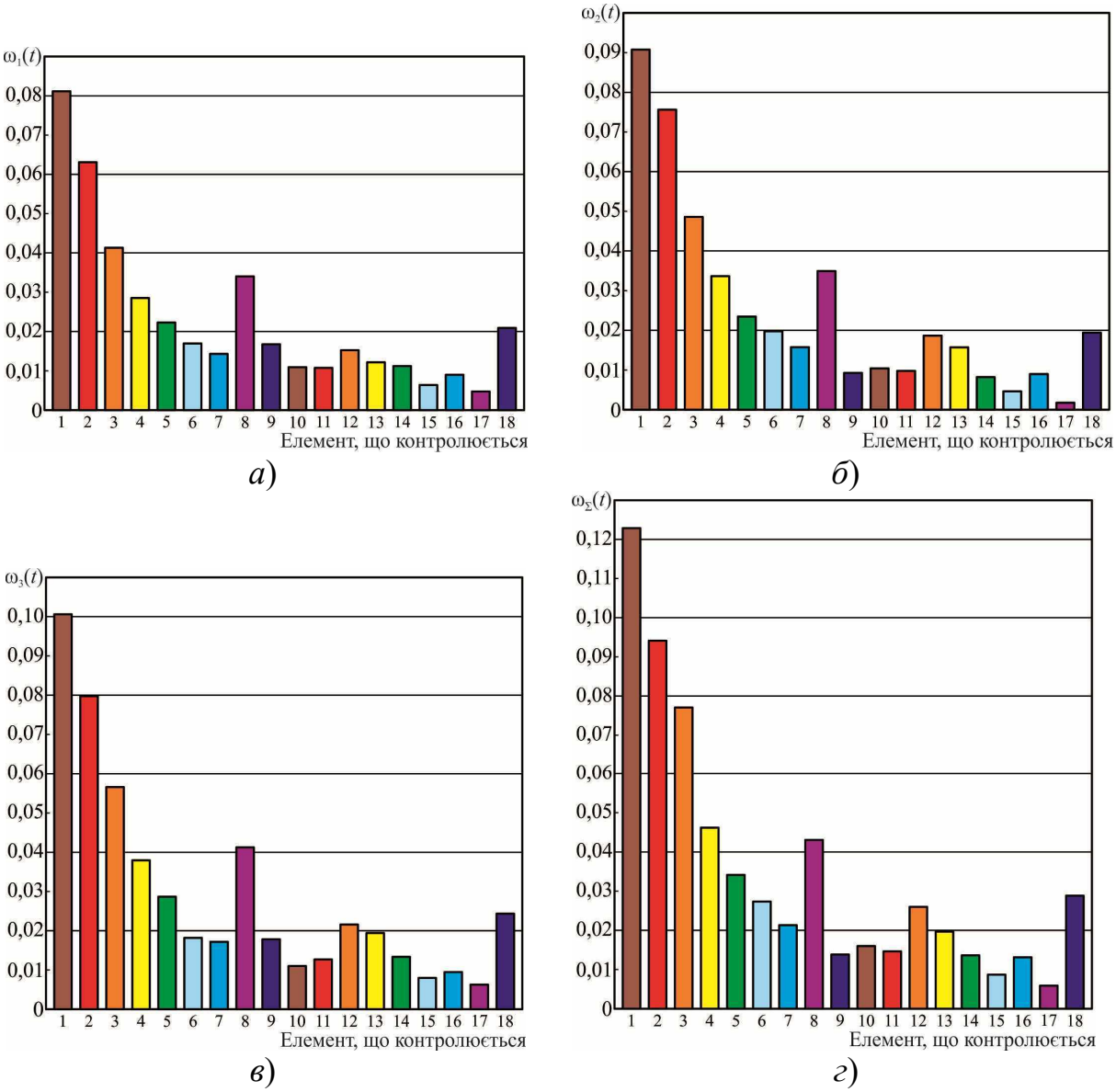


Рисунок 1 – Параметр потоку відмов $\omega_i(t)$ за різний експлуатаційний період роботи дизеля Wärtsilä 6R32BC в складі пропульсивного комплексу судна дедвейтом 6450 тонн:
а – 1…5 років; *б* – 5…10 років; *в* – 10…15 років; *г* – загальній потік відмов

У разі наявності масиву статистичних даних з виникнення відмов та розрахованих за цим масивом значень потоку відмов величина щільності вірогідності виникнення ризику може бути отримано за виразом

$$f = \omega(t) \cdot \delta t$$

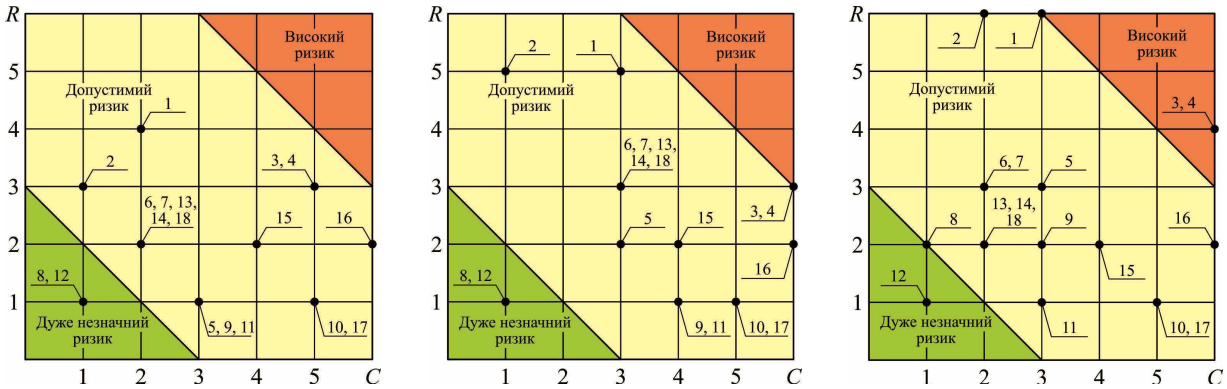
в якому кожному часовому інтервалу δt відповідає конкретне значення потоку відмов $\omega(t)$. При цьому значення щільності вірогідності виникнення ризику визначається для різних експлуатаційних періодів роботи дизелі – 1…5 років, 5…10 років, 10…15 років.

Параметр C , що входить до матриці розподілення вірогідності виникнення ризику, також визначає градації трудомісткості усунення відмов. У табл. 2 представлені градації параметра C з відповідними кількісними характеристиками трудомісткості ремонту T. Під трудомісткістю ремонту тут розуміється добуток середньої трудомісткості одного ремонту T_1 (вираженої в людино/годин) і середньої кількості відмов $q(\delta t)$ на проміжку часу експлуатації $T=q(\delta t)\cdot T_1$, що розглядається.

Таблиця 2 – Градації вірогідності виникнення ризику та витрат

Градація вірогідності виникнення ризику *R*	Щільність вірогідності виникнення ризику	Градації витрат *C*	Трудовитрати, щодо усунення відмови елемента двигуна, люд/год
1	0,01…0,17	1	0…16
2	0,17…0,33	2	16…32
3	0,33…0,5	3	32…48
4	0,5…0,67	4	48…64
5	0,67…0,83	5	64…80
6	0,83…1,0	6	більше 80

Матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю Wärtsilä 6R32BC за різний період експлуатації наведені на рис. 2.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Матриці розподілення вірогідності виникнення ризику елементів суднового дизелю Wärtsilä 6R32BC за різний період експлуатації:
а – 0…5 років; *б* – 5…10 років; *в* – 10…15 років

Аналізуючи наведені дані потоку відмов (рис. 1, *а*, *б*, *в*) за період експлуатації 1…5 років, 5…10 років, 10…15 років, можна відзначити, що стабільно високу ймовірність настання ризику мають відмови форсунок. В останньому п'ятирічному циклі в область високого ризику додані паливні насоси високого тиску та трубопроводи високого тиску.

Наслідки відмов основних елементів головної енергетичної установки (середньообертового дизеля Wärtsilä 6R32BC) судна типу «річка-море» дедвейтом 6450 тонн наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Наслідки відмов основних елементів головної енергетичної установки (середньообертового дизеля Wärtsilä 6R32BC) судна дедвейтом 6450 тонн

Елемент головної енергетичної установки	Середня тривалість ремонту, то пов’язаного з ним часу виведенням судна з експлуатації, год	Відносна частина втраченого часу, пов’язаного з виведенням судна з експлуатації, %
1	2	3
Циліндро-поршнева група	164	53,59
Газотурбонагнітач	46	15,03
Паливний насос високого тиску	36	11,76
Паливна система	16	5,24

Закінчення табл. 3

1	2	3
Система охолодження	9	2,94
Форсунка	23	7,52
Циркуляційна система мащення	8	2,61
Пуско-реверсивна система	4	1,31
Загальний час	306	100

Стосовно стандартів управління безпечної експлуатації головних енергетичних установок засобів водного транспорту найбільшу загрозу безпечній роботі становить недостатнє розпізнавання (визначення) небезпеки, оскільки не будучи правильно визначеними, небезпеки не можуть бути належним чином оцінені та взяті під контроль. «Оцінка ризику» – це ретельне дослідження небезпек, які могли б заподіяти шкоду людям, шкоду довкіллю та вантажу, або шкоду технологічному процесу, що здійснюється на суднах. Оцінивши ризик можна вирішувати, чи достатньо вжитих запобіжних заходів, або для запобігання шкоди має бути зроблено більше. Мета полягає в тому, щоб на суднах звести до мінімуму аварійні події з енергетичною установкою та погіршення технічного стану суднового обладнання та безпосередньо корпусу судна. Оцінка ризику складається з наступних етапів: визначення ризиків, пов'язаних із виробничим процесом; припущення щодо наслідків події, яка може статися внаслідок цієї небезпеки, та ступені можливої шкоди; приблизна оцінка ймовірності наступних повторень подібних подій; ухвалення рішення прийнятний (припустимий) даний ризик, чи ні. Оцінка ризику – це процес систематичного зменшення ризику. Це процес прийняття рішень щодо проведення робіт, приймаючи або змінюючи ступінь ризику. Процес обмежує та утримує ризик ідентифікованих небезпек у певних допустимих межах.

Висновки. На підставі виконаних досліджень визначимо наступне.

1. Оцінка ризиків та вибір правильного методу технічного обслуговування деталей та вузлів головної енергетичної установки є дієвим фактором підвищення її подальшої безаварійної експлуатації протягом усього життєвого циклу. Особливо ця оцінка актуальна для головної енергетичної установки судна та систем, які забезпечують її функціонування.

2. В результаті аналізу статистичних даних щодо експлуатації суднового дизеля Wärtsilä 6R32BC у складі пропульсивного комплексу судна типу «річка-море» дедвейтом 6440 тонн за п'ятнадцятирічний період експлуатації з інтервалом кожні п’ять років встановлено, що потік відмов за кожним із тимчасових інтервалів має різне значення для всіх розглянутих деталей та вузлів, що обумовлює різний ступінь ризику для двигуна: найбільшу ймовірність ризику за період експлуатації мають форсунки; в інтервалі експлуатації 10...15 років зростає ймовірність ризику виникнення аварійної ситуації для паливних насосів високого тиску та трубопроводів високого тиску, а також підвищується ризик виникнення аварійної ситуації для циліндрових кришок, циліндрових втулок та поршневих кілець.

3. Наслідки виникнення аварійних події найбільш доцільно визначати за допомогою матриць розподілення вірогідності ризикової події, які враховують градації щільності вірогідності виникнення ризику та градації витрат часу, що необхідні для усунення відмов в роботі відповідних елементів.

3. Саме розрахунок матриць розподілення вірогідності ризиків пропонується як метод діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.

2. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорта на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.

3. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов 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. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

5. 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.

6. 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.

7. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Maritime Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

8. Тимощук 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.

9. Майданевич С.Б., Тимощук 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.

10. 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 Maritime Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

11. 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 of Maritime Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

12. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

13. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціювання та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних суднах і газовозах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

14. 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.

15. 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.

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. 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., 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.

19. 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.

20. 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 Maritime Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120

21. 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.

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. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

27. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22-32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868.

28. 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.

29. 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.

30. Звєрьков 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.

31. Тимощук 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.

REFERENCES

1. 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.

2. Bohomia V., Bazhak O. // Water transport – 2022. – Vol. 1(35). – P. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.

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. Bazhak O.V. Method of increasing safety of shipping // Water transport. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

5. 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.

6. 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.

7. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kuˇcera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // Journal of Maritime Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.

8. 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.

9. Maydanevich S.B., Tymoshchuk O. Subjects and principles of the international maritime low // Water transport. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.

10. 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 Maritime Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120.

11. 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 of Maritime Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

12. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

13. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Lihanenko V.V., Tryshyn V.V. Model of air conditioning and cooling system on modern oil-filling ships and gas carriers // Water transport – 2022. – Vol. 1(35). – P. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

14. 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.

15. 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.

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. 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., 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.

19. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // Automation of ship technical facilities. – 2018. – Vol. 24. – P. 72-80.

20. 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 Maritime Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 120. https://doi.org/10.3390/jmse11010120

21. 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.

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. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22-32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

Sagin S.V., Bondar S.A.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELEMENTS OF THE MAIN POWER PLANT OF WATER TRANSPORT

Consider the issue of developing a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport. It was determined that the operation of propulsion complexes of water transport means is related to ensuring the reliability, reliability and proper technical condition of all its components - the ship's hull, the main engine and the propeller. At the same time, the greatest attention is paid to the main power plant, it is on its ability to perform the functions of

converting fuel energy into rotational movements of the shaft and the propeller connected to it that the speed and maneuvering characteristics of the vessel depend. Even a temporary lack of the ability of the main power plant to ensure the movement of the ship can lead to irreversible consequences and cause accidents, environmental pollution, loss of cargo, ship collisions, harm to the ship's crew. It is noted that the criteria for assessing the occurrence of emergency events are based on strictly established risk levels. Risk identification is performed based on the analysis of hazards associated with the flow of mechanism failures in the specified period of operation. Such identification was carried out by collecting, processing and analyzing statistical data of engine logs from the operation of the main power plant of the "River-Sea" class ship over a fifteen-year period of operation. The collection and processing of statistical data was carried out for the following intervals – 1...5 years, 5...10 years, 10...15 years, and during the entire specified time, the main power plant was operated according to the continuous maintenance system. The analysis of the received information made it possible to calculate the value of the failure flow parameter of the Wärtsilä 6R32BC marine medium-speed diesel engine, which served as the main engine on a 6450-ton vessel. The failure rate values were determined; gradations of the probability of risk occurrence and the costs associated with their elimination, as well as calculated matrixes of the distribution of the probability of risk occurrence of elements of the marine diesel engine. It is the calculation of risk probability distribution matrices that is proposed as a method of diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport.

***Key words**: diagnostics, main power plant, means of water transport, method, probability of risk occurrence, reliability, reliability, risk assessment, risk, technical condition, technical maintenance*

УДК 629.5 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.20

Сагін С.В., Сагін С.С.

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ БЕЗПЕЧНОГО РОЗХОДЖЕННЯ

Розглянуті методи контролю та управління рухом морських суден під час маневрування з метою забезпечення їх безпечного розходження за умовою хорошої видимості. Для вирішення питання щодо забезпечення безпеки судноплавства були розглянуті підмножини ситуацій надмірного зближення суден з різною взаємною відповідальністю та з різним розташуванням суден один від одного, що регламентуються відповідними вимогами Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі які встановлюють взаємодію суден залежно від ситуації, що виникла під час небезпечного зближення.

Визначено, що процес розходження двох суден передбачає зміну ситуації небезпечного зближення на допустиму безпечну ситуацію за допомогою маневру розходження. Вказано, що для забезпечення процесу безпечного розходження важливою складовою є управління ситуацією зближення, за допомогою якого визначається потенційна можливість зміни небезпечної ситуації шляхом виконання маневру розходження. Також зазначено, що через велику кількість різноманітних ситуацій у взаємних розташуваннях суден, виникають певні труднощі в коректності дій, що приймаються з метою забезпечення їх безпечного розходження. Тому питання формалізації процесу розробки методів управління рухом судна, у частині маневрування суден під час розходження, а також визначення методу управління рухом суден

морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження є актуальним та перспективним науковим напрямом яке впливає на безпеку судноплавства.

Як основні небезпечні ситуації, що виникають під час розходження суден, розглянути ситуація обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), ситуація зближення суден на зустрічних курсах, ситуація зближення суден на курсах, що перетинаються. Для кожної з цих ситуацій запропоновані аналітичні залежності з визначення небезпечних курсів руху суден, які попереджують їх зіткнення. Запропоновані рішення сприяють створенню методу управління рухом суден під час виникнення різних ситуаціях їх небезпечного зближення .

Отримані результати свідчать про можливість застосування розроблених аналітичних виразів в сучасних електронних автоматичних системах, що працюють за принципом реального часу з метою визначення та розв'язання завдань на розходження, які є суттєвою підтримкою для навігаційних офіцерів під час виникнення ситуацій небезпечного зближення суден.

Ключові слова: безпека судноплавства, метод управління, морський транспорт, навігаційна обстановка, попередження зіткнення суден, рух судна, управління рухом судна.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Забезпечення та контроль безпеки судноплавства є найбільш актуальною проблемою, яка виникає під час експлуатації суден морського транспорту [1, 2]. Однією з її важливих складових є своєчасне попередження зіткнення суден в ситуації їх надмірного зближення. В ситуації небезпечного зближення пари чи групи суден їх взаємодія регламентується відповідно до вимог Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі (МПЗЗС-72), в яких використовується принцип бінарної координації [3, 4].

Через велику кількість різноманітних ситуацій у взаємних розташуваннях суден під час їх розходження, виникають певні труднощі в коректності дій, що приймаються для забезпечення безпеки судноплавства. В даний час розробляються електронні автоматичні системи, що працюють за принципом реального часу з метою визначення та розв'язання завдань на розходження суден на базі вимог МПЗЗС-72, які є суттєвою підтримкою у ситуаціях небезпечного зближення суден, але остаточне рішення щодо вибору способу розходження суден та його здійснення повністю полягає на навігаційного офіцера [5, 6]. Тому питання формалізації процесу розробки методів управління рухом судна у частині маневрування суден під час розходження, а також визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження є актуальним та перспективним науковим напрямом яке суттєво впливає на безпеку судноплавства [7, 8]. При цьому кожна ситуація, що пов'язана з розходженням морських суден, має окремо рішення та повинна обов'язково відповідати правилам МПЗЗС-72.

Процес розходження передбачає зміну ситуації небезпечного зближення на допустиму безпечну ситуацію за допомогою маневру розходження. Тому для процесу розходження важливою характеристикою є управління ситуацією зближення, при якому визначається потенційна можливість зміни її маневром розходження. Незважаючи на систематичне розглядання та аналізування цього питання, випадків зіткнення суден з кожним роком не зменшується, а навпаки тільки збільшується, що приводить до виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з неймовірними фінансовими витратами [9, 10], тимчасовим припиненням судноплавства в окремих районах [11, 12], забрудненням довкілля [13, 14] та втратами вантажу [15, 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання безпеки судноплавства та попередження зіткнення суден морського транспорту досліджувалися та аналізувалися у багатьох наукових працях [17, 18]. Одним із способів попередження зіткнень суден є метод гнучких стратегій розходження, які передбачають формування стратегій розходження кількох суден [19] .

Формалізація взаємодії суден під час виникненні загрози зіткнення можлива шляхом складання аналітичного алгоритму розходження для існуючої ситуації [20]. Проте підмножина різних ситуацій надмірного зближення суден вимагає детального розгляду ситуацій відповідно до регламенту МПЗЗС-72. Одним з методів попередження зіткнення суден у морі є зміщення на лінію паралельну шляху їх руху [21], втім за умов інтенсивного судноплавства цей метод не завжди є ефективним.

Розв'язання завдання забезпечення безпеки під час розходження двох суден, або групи суден також досягається шляхом використання аналітичних виразів для розрахунку межі двовимірних областей неприпустимих параметрів руху суден елементарної групи [22], відповідно до яких на межі областей безпечного руху суден досягається рівність дистанції найкоротшого зближення та гранично допустимої дистанції, яка гарантує відсутність зіткнення.

З метою формування області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден та визначення оптимальних швидкостей розходження, розроблено процедуру, яка полягає в оптимізації швидкісних параметрів судна з урахуванням обставин існуючої ситуації. За її допомогою здійснюється визначення безпечної швидкості суден на різних курсах маневрування як у відкритих водах також і в обмежених умовах [23]. Дослідження перспективних автономних судових систем для ухилення від зіткнення та її теоретичне обґрунтування з урахуванням факторів, що до повної автономної навігації, поки ще розглядається у тестових випадках.

Існує метод формування області допустимих комбінованих маневрів [24], в який небезпечну ситуацію розходження судна з двома іншими суднами вирішують шляхом зміни курсу та використання пасивного гальмування. За його допомогою в кожній точці небезпечної області маневрування визначають три параметри маневру розходження: час та курс ухилення для розходження з першим судном, а також швидкість, до якої знижується початкова швидкість під час гальмування судна.

Для надання можливості розробки індивідуального методу управління рухом судна та деталізації отриманої інформації, є необхідність врахування інерційності судна під час розрахунку параметрів його стратегії розходження зі зміною курсу [19]. В цьому випадку можливість виявити ситуацію небезпечного зближення базується на визначенні методу оцінки ризику зіткнення з використанням режиму істинного руху [25]. За цього вводяться лінія прогнозованого зіткнення та зона перешкод, ці значення пов'язані з істинним рухом та дають змогу забезпечити безпечне плавання у стиснутих водах, але при цьому необхідно постійно враховувати зміну курсу та швидкості суден.

Різноманіття методів, що сприяють підвищенню безпеки судноплавства під час розходження судна, не вирішують питання розробки методів управління рухом судна та оцінки навігаційних ризиків для навігаційного переходу судна в складних умовах плавання. Однієї з таких умов є ситуація надмірного зближення, яка поділяється на додаткові підмножини, що виникають під час обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), зближення суден на зустрічних курсах, зближення суден на курсах, що перетинаються.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є аналіз підмножини ситуацій надмірного зближення суден яка наддасть можливість розробити методи контролю та управління рухом морських суден, у частині маневрування суден для розходження за умовою хорошої видимості

Виклад основного матеріалу. З метою узгодження маневрів розходження двох суден у МПЗЗС-72 передбачено логічну систему, яка враховує стан видимості. У разі хорошої видимості взаємні обов'язки пари суден поділені залежно від їх статусу (до яких відносяться судна з механічним двигуном, вітрильні судна, рибальські судна, судна, скути своєю осадкою, судна, скути в можливості маневрувати, судна що не можуть управлятися) та характеристик ситуації зближення. Під час зниження видимості вимоги МПЗЗС-72 не передбачають взаємних обов'язків суден – регламентуються дії лише судна, що оперує.

Розглянемо вимоги МПЗЗС-72 для хорошої видимості. Насамперед зазначимо, що в цьому випадку вимоги полягають у необхідності маневрування кожним із суден для запобігання

зіткненню. Іноді вказується необхідна сторона ухилення судна під час маневру. Тому з погляду формалізації вимог МПЗЗС-72 для хорошої видимості доцільно розглянути для кожного судна характеристику необхідності маневрування Man_1 та Man_2, а також характеристику необхідної сторони ухилення судна Trn_1 та Trn_2.

Очевидно, що характеристики Man_1 та Man_2 можуть набувати лише двох значень, а саме: 1 – за необхідністю маневрування та 0 – в разі необхідності зберігати свої параметри руху. Характеристики Trn_1 та Trn_2 мають три значення, а саме 1 – дозволено ухилення вправо, 2 – дозволено ухилення вліво та 3 – дозволено ухилення в обидві сторони (вправо та вліво).

Характеристики Man_1, Man_2, Trn_1 та Trn_2, що відображають вимог МПЗЗС-72 для хорошої видимості, є виходом формальної системи МПЗЗС-72, яку позначимо F. Таким чином, вихід Y формальної системи МППЗЗ-72 можна представити у вигляді

$$Y = \{Man_1, Man_2, Trn_1, Trn_2\}.$$

Аналізуючи МПЗЗС-72, робимо висновок, що входом X системи F є ситуація небезпечного зближення суден S_d, яка визначається пеленгом α та дистанцією D між суднами, їх параметрами руху (швидкостями та курсами першого V_1, K_1 та другого V_2, K_2) та статусами r_1, r_2. Тому можна записати $Y=F(X)$, де система F є відображенням безлічі ситуацій небезпечного зближення суден у безліч характеристик вимог МПЗЗС-72, тобто:

$$\{Man_1, Man_2, Trn_1, Trn_2\} = F(D, \alpha, V_1, V_2, K_1, K_2, r_1, r_2),$$

Безліч всіх можливих ситуацій S, що залежать від перерахованих параметрів, позначимо через Mn. Оскільки ситуація небезпечного зближення суден S_d можлива лише за її зближенні, то з множини Mn слід виділити підмножину Mn_1 ситуацій зближення – $Mn_1 \subset Mn$. Очевидно, підмножина Mn_1 містить підмножину Mn_2 ситуацій небезпечного зближення S_d – $Mn_2 \subset Mn_1$, для яких характерно, що прогнозована дистанція найкоротшого зближення менша $D_{\min}$ від граничнодопустимої дистанції зближення D_d.

Ситуації S_d, як елементи підмножини Mn_2, повинні задовольняти умову зближення U_1 та умови U_2 того, що зближення є небезпечним. Умова зближення U_1 залежить від зменшенні дистанції D між суднами, тобто $D \to 0$, а умові U_2 відповідає нерівність $D_{\min} < D_d$.

Отримане за допомогою виконання умов U_1 та U_2 підмножина ситуацій небезпечного зближення містить різні ситуації, що відповідають різним правилам МПЗЗС-72. Насамперед підмножина Mn_2 містить підмножину ситуацій обгону Mn_{ob}, у яких немає істотний статус суден. У цій ситуації судно може бути таким, що обганяється або таким, що обганяє. Тому підмножина ситуацій обгону Mn_{ob} є об'єднанням підмножини ситуацій Mn_{ob}^1, коли судно є таким, що обганяє, та підмножини ситуацій Mn_{ob}^2, коли судно є таким, що обганяється, тобто.

$$Mn_{ob} = Mn_{ob}^1 \bigcup Mn_{ob}^2.$$

Відповідно до МППСС-72, судном, яке обганяє у ситуації небезпечного зближення називається судно, що знаходиться у секторі видимості кормового вогню судна з яким зближується, тобто на 22,5° ($2\pi/16$ або 2 румба) позаду траверза.

Знайдемо умову U_3, яка визначає ситуацію обгону. Для цього необхідно знати курс судна, що обганяє K_1, курс судна, що обганяється K_2 та пеленг із судна, що обганяє на судна, що обганяється α.

В ситуації, яка наведена на рис. 1, *а*, судно 1, є таким, що обганяє. Така ситуація має місце, коли зворотний пеленг $\alpha+\pi$ укладено між напрямками γ_s і γ_p, що визначають межі видимості кормового вогню, причому

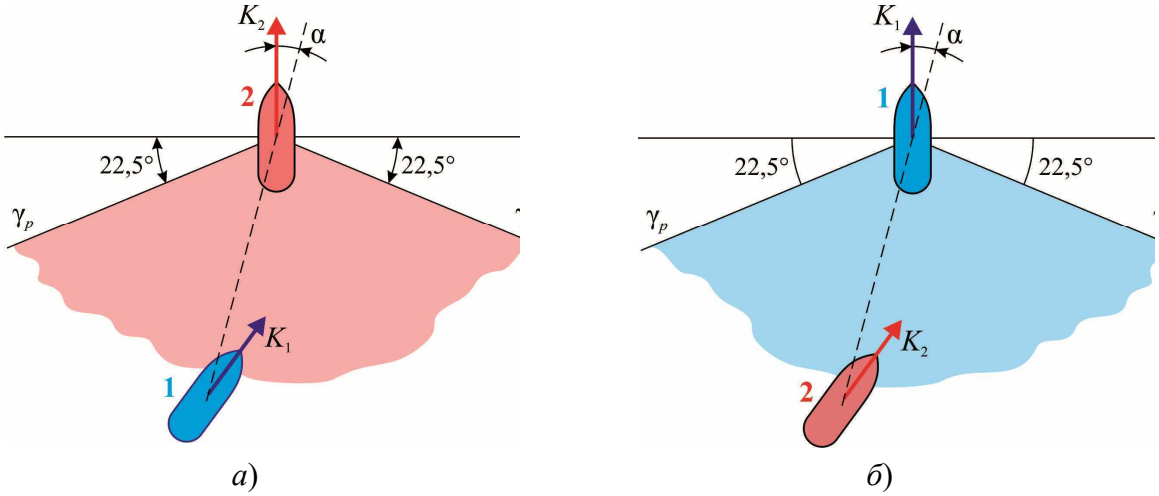
$$\gamma_s = K_2 + \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right), \quad \gamma_p = K_2 + \pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right).$$

Аналітично ця ситуація виникає, коли одночасно виконуються умови

$$\sin(\alpha + \pi - \gamma_s) > 0 \text{ та } \sin(\gamma_p - \alpha - \pi) > 0.$$

Якщо в останні нерівності підставити вирази для γ_s і γ_p, то отримаємо умову U_3 для підмножини ситуацій обгону Mn_{ob}^1, якщо судно 1 обганяє судно 2

$$\sin\left(\alpha - K_2 + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right) > 0, \text{ та } \sin\left(K_2 + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right) - \alpha\right) > 0.$$



а) *б*)

Рис. 1. Ситуації обгону:
а – 1 – судно, що обганяє, 2 – судно, що обганяється;
б – 1 – судно, що обганяється, 2 – судно, що обганяє

На рис. 1, *б* показана ситуація, коли судно 1 є таким, що обганяється судном 2. У цьому випадку пеленг α знаходиться між напрямками γ_s і γ_p, та

$$\gamma_s = K_1 + \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right), \quad \gamma_p = K_1 + \pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)$$

Умовою виникнення такої ситуації є справедливість нерівностей

$$\sin(\alpha - \gamma_s) > 0 \text{ та } \sin(\gamma_p - \alpha) > 0.$$

Таким чином, умова U_3 для підмножини ситуацій обгону Mn_{ob}^2, якщо судно є таким, що обганяється:

$$\sin\left(\alpha - K_1 - \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right)\right) > 0 \text{ та } \sin\left(K_1 + \left(\pi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{8}\right)\right) - \alpha\right) > 0.$$

Всі інші ситуації небезпечного зближення, крім ситуацій обгону, враховують статуси суден, що зближаються, r_1 і r_2, причому вони складають підмножину Mn_r. Вочевидь, що

$$Mn_r = Mn_2 / Mn_{ob}.$$

Для встановлення відносини пріоритету в МПЗЗС-72 всі судна поділяються на шість рівнів, упорядкованих послідовності пріоритету: судна з механічним двигуном, вітрильні судна, рибальські судна, судна, скути своєю осадкою, судна, скути в можливості маневрувати, судна що не можуть управлятися.

Якщо судна належать одному рівню, то призначення пріоритетів передбачено лише для рівнів: суден з механічним двигуном і вітрильних суден (правила 12, 14 та правило 15 МПЗЗС-72), причому тільки в цьому випадку є вимоги та рекомендації щодо вибору сторони ухилення під час розходження.

Тому підмножина ситуацій Mn_r складається з трьох підмножин: Mn_r^d – судна з різними статусами, Mn_r^1 – судна з механічним двигуном та Mn_r^2 – вітрильні судна. Умова U_4 належності ситуації небезпечного зближення підмножині Mn_r^d виражається співвідношенням $r_1 \neq r_2$, умова U_5 визначає підмножину Mn_r^1 ситуацій небезпечного зближення суден із механічним двигуном і характеризується співвідношенням $r_1=r_2=1$. Підмножина Mn_r^2 небезпечного зближення двох вітрильних суден не розглядатимемо, вважаючи, що транспортне судно не є вітрильним.

Розглянемо підмножину Mn_r^1 ситуацій небезпечного зближення суден з механічним двигуном, які характеризуються правилами 14 і 15 МПЗЗС-72, тобто зближення суден на протилежних курсах та курсах, що перетинаються. Очевидно, підмножина Mn_r^1 містить підмножини Mn_{op} ситуацій зближення суден на протилежних курсах та Mn_{cr} ситуацій зближення суден на курсах, що перетинаються, тобто $Mn_{op} \subset Mn_r^1$ та $Mn_{cr} \subset Mn_r^1$.

Визначимо умову U_6 належності ситуації небезпечного зближення підмножини Mn_{op}, скориставшись схемою, що наведена на рис. 2.

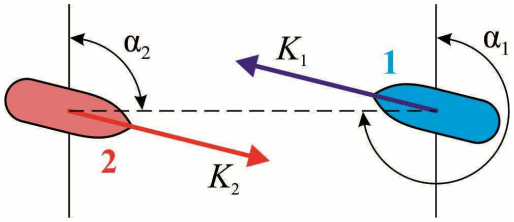


Рис. 2. Ситуація зближення суден, що рухаються протилежними або майже протилежними курсами

Протилежними або майже протилежними курсами суден, що зближуються, вважатимемо такі, які відрізняються не більше 5° від пеленгу, причому це справедливо для обох суден. Як випливає з рис. 2, для цього слід, щоб одночасно виконувались нерівності:

$$(\alpha_1 - K_1) \le 5° \text{ та } (\alpha_2 + \pi - K_2) \le 5°$$

де α_1, α_2 – пеленг з одного судна на інше.

Ця умова має такий математичний вираз:

$$\cos(\alpha_1 - K_1) \le \cos 5° \text{ та } \cos(\alpha_2 + \pi - K_2) \le \cos 5°$$

що і є умовою U_6.

Умова U_7 належності ситуації небезпечного зближення підмножині Mn_{cr}, представлена на рис. 3.

У ситуації зближення суден, що рухаються на курсах, які перетинаються, їх курсові кути γ_1 і γ_2 мають протилежні знаки, тобто.

$$\sin\gamma_1 \sin\gamma_2 < 0.$$

Враховуючі, що

$$\gamma_1 = \alpha_1 - K_1,\ \gamma_2 = K_2 - \alpha_2$$

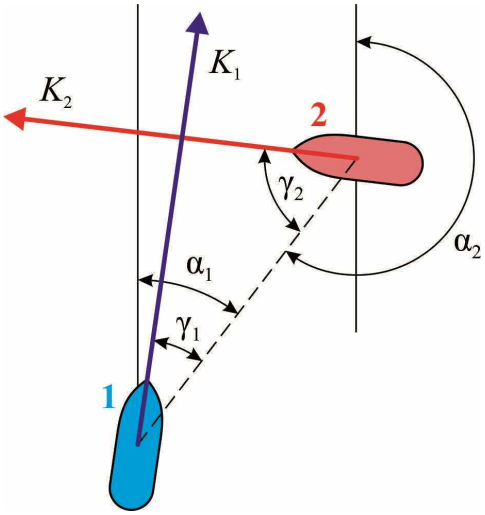


Рис. 3. Ситуація небезпечного зближення суден на курсах, що перетинаються

умова U_7 характеризуватиметься такою нерівністю

$$\sin(\alpha_1 - K_1)\cdot\sin(K_2 - \alpha_2) < 0\,.$$

При цьому судно 2 знаходиться праворуч або ліворуч від напрямку руху судна 1, тому підмножина Mn_{cr} містить підмножину ситуацій Mn_{crs}, коли судно 2 знаходиться праворуч від судна 1 і підмножину Mn_{crp}, коли судно 2 рухається зліва від судна 1. Очевидно, якщо виконується нерівність $\sin(\alpha_1 - K_1)>0$, то судно 2 знаходиться праворуч від судна 1. У протилежному випадку судно 2 знаходиться ліворуч від судна 1. Отже, умова U_8 належності ситуації небезпечного зближення S_d підмножин Mn_{crs} або Mn_{crp} визначається знаком виразу $\sin(\alpha_1 - K_1)$. Причому, якщо $\sin(\alpha_1 - K_1)>0$, то $S_d \in Mn_{crs}$, у разі коли $\sin(\alpha_1 - K_1)<0$ має місце $S_d \in Mn_{crp}$.

Висновки. Як результат виконаних досліджень зробимо наступні висновки.

1. Основні підмножини ситуацій небезпечного зближення, якими є ситуація обгону (відносно варіантів судно, що обганяє, та судно, що обганяється; а також судно, що обганяється, та судно, що обганяє), ситуація зближення суден на зустрічних курсах, ситуація зближення суден на курсах, що перетинаються, змушують до розробки методу з визначення послідовності дій, пов'язаних з маневруванням суден з метою попередження їх зіткнення. При цьому алгоритм цих дій повинен відповідати вимогам Міжнародних правил запобігання зіткнення суден у морі щодо маневрування суден під час розходження.

2. Досліджено моделювання ситуацій надмірного зближення суден та розглянута формалізація МПЗЗС-72 у частині маневрування суден для розходження за умов гарної видимості.

3. Розробленні аналітичні вирази для умов реалізації ситуації надмірного зближення для кожної з підмножин, які сприяють створенню методу управління рухом судна в різних ситуаціях небезпечного зближення з судами.

4. Запропонований метод управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження засновигається на використанні аналітичних виразів, що враховують умови ситуацій надмірного зближення для кожної з підмножин.

Запропоновані рішення сприяють створенню методу управління рухом суден під час виникнення різних ситуаціях їх небезпечного зближення .

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píˇstˇek V., Kuˇcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. – 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.

2. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

3. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунов 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., Тимощук 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. Тимощук 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. Мадей В.В., Волков О.М., Сагін С.С. Корегування навігаційного переходу під час забезпечення екологічних показників роботи суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 52-66. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-52-66.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7

18. Тимощук 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.

19. Тимощук 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.

20. 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.

21. 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

22. 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.

23. Ворохобин И.И. 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.

24. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департменізації 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.

25. Бурмака И.А., Ворохобин И.И., 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

REFERENCES

1. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pí˘st˘ek V., Ku˘cera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. – 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.

2. Bazhak O.V. Method of increasing safety of shipping // Water transport. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

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 low // 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. Madey V., Volkov O., Sagin S. Correction of the navigation passage while ensuring the environmental performance of marine diesel engines // Automation of ship technical facilities: Research journal. – 2023 – Vol. 28. – P. 52-66. doi.org/10.31653/1819-3293-2023-1-28-52-66.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

Sagin S.V., Sagin S.S.

DETERMINATION OF THE METHOD OF CONTROLLING THE MOVEMENT OF MARINE TRANSPORT VESSELS WHILE ENSURING THEIR SAFE DIVERGENCES

Considered the methods of control and management of the vessel movements, during manoeuvring in order to ensure their safe divergences under the condition of good visibility. To solve the question of ensuring the safety of navigation , subsets of situations of excessive convergence of ships considered with different mutual responsibilities and with different locations of ships from each other, which are regulated by the relevant rules of the International Rules for the Prevention of Collisions of Ships at Sea, which establish the interaction of ships depending on the situation that arose during dangerous rapprochement.

Determined that the process of divergence of two ships involves changing the situation of dangerous convergence to an acceptable safe situation with the using maneuver of divergence. Indicated that in order to ensure the process of safe divergence, an important component is the management of the convergence situation, which determines the potential possibility of changing the dangerous situation by performing the divergence manoeuvre. It is also stated that due to the large number of various situations in the mutual locations of ships, certain difficulties arise in the correctness of actions taken to ensure their safe divergence. Therefore, the issue of formalization of the process of developing methods for controlling the movements of the vessels, in terms of manoeuvring ships during divergences, as well as determining the method of managing the movement of sea transport vessels while ensuring their safe divergences which is a actual and promising scientific direction that affects on the safety of navigation.

As the main dangerous situations that arise during the separation of ships, consider the situation of overtaking (relative to the options of the overtaking vessel and the overtaken vessel; as well as the overtaken vessel and the overtaking vessel), the situation when vessel are metting on reciprocal or nearly reciprocal courses, the vessel crossing situation. For each of these situations, analytical dependencies are proposed for determining dangerous courses of movement of vessels that prevent

their collision. The proposed solutions contribute to the creation of a method of controlling the movement of vessels during the occurrence of various situations of their dangerous approaching.

The obtained results indicate the possibility of using the developed analytical expressions in modern electronic automatic systems operating on a real-time basis for the purpose of determining and solving divergence tasks, which are essential support for navigation officers during situations of the vessel dangerous divergences.

Key words: *control method, maritime transport, navigation situation, safety of navigation, ship collisions prevention, ship movement management, ship movement.*

УДК 656.6 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21

Булгаков М.П., Бурлаченко Д.А., Никитюк П.В., Щенявський Г.С., Кучеренко В.П.

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ БАЛАСТНИМИ ВОДАМИ НА СУДНАХ ШЛЯХОМ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ЗА ЇХ ЯКІСТЮ

Зростання обсягів морської діяльності та транспортування вантажів призводить до значного викиду баластних вод у природне середовище. Це викликає серйозні екологічні проблеми, оскільки тисячі видів водних організмів переносяться через баластні води, поруч з іншими формами забруднення. В даній статті розглядається важливість контролю та управління баластними водами, оцінюючи різні методи моніторингу. Зокрема, розглядаються можливості використання технологій дистанційного моніторингу, які дозволяють уникнути затримок, пов'язаних із зразками води при вході суден у порт. У статті проаналізовані різні підходи до моніторингу, розглянуті схеми встановлення додаткових вузлів, роботи та обробки отриманої інформації. Впровадження передових технологій дистанційного моніторингу баластних вод сприятиме економії часу для суден, оминаючи необхідність збору та аналізу проб баластної води до початку вантажних операцій в порту що призведе до оптимізації часу, який раніше витрачався на ці процеси, сприяючи ефективності та швидкості обробки суден в порту.

Ключові слова: система обробки баластної води, моніторинг, датчик, біологічні показники, BW-монітор

Вступ. Сьогодні морська діяльність активно зростає, обсяг вантажів, що переміщуються морем, становить близько 90% від загального обсягу транспортних вантажів, що супроводжується збільшенням обсягу баластних вод, які скидаються в навколишнє середовище [1]. Тисячі видів водних організмів транспортуються з одного місця в інше по морю та океану через баластні води. При інших видах забруднення, таких як розливи нафти, можна вжити заходів для поліпшення і відновлення навколишнього середовища, але вплив чужорідних видів практично неможливо відновити [2]. Щороку у світі збитки, спричинені чужорідними організмами під час циркуляції суднових баластних вод, становлять до 10 мільярдів доларів США на рік, тому управління та контроль за чужорідними організмами через експлуатацію баласту є дуже важливим [4].

Моніторинг та забезпечення дотримання вимог повинні бути послідовними, суворими та ефективними [2]; їх можна розділити на дві основні частини: відбір проб баластних вод та

аналіз проб, кожна з яких пов'язана з певними труднощами. Низка інструментів і технологій розробляється як для відбору проб, так і для їх аналізу, а нещодавні дослідження показали багатообіцяючі результати щодо пристроїв для відбору проб. Для аналізу зразків можуть застосовуватися два типи методів: "індикативний" або "детальний" аналіз. "Детальний" аналіз, такий як мікроскопія, забезпечує пряме і точне вимірювання кількості життєздатних організмів у зразку, що, як правило, вимагає великого наукового досвіду, дорогого обладнання та часових рамок, як правило, занадто довгих для сценарію забезпечення дотримання вимог[3]. На противагу цьому, "індикативні" методи аналізу повинні бути швидкими і простими у використанні, зазвичай вони вимірюють біологічні, фізичні або хімічні параметри, які можуть бути пов'язані з кількістю життєздатних організмів у зразку, щоб вказати на потенційну невідповідність (грубе перевищення) Регламенту D-2 [3,6]. Сучасні тенденції в модернізації суден із фокусом на системи очищення баластних вод, перспективи технологічних інновацій у морській промисловості, аспекти управління баластними водами та заходи для збільшення екологічної безпеки морського транспорту розглянуто в [8-10].

Постановка проблеми. Міжнародна морська організація прийняла Міжнародну конвенцію з контролю суднових баластних вод і осадів та управління ними у 2004 році з метою мінімізації перенесення шкідливих водних організмів і патогенів у суднових баластних водах (IMO, 2004). Правило D-2 обмежує концентрацію життєздатних організмів розміром ≥ 50 мкм у мінімальному вимірі при скиданні до < 10 життєздатних організмів на кубічний метр, а організмів розміром < 50 мкм і ≥ 10 мкм у мінімальному вимірі (далі - 10-50 мкм) - до < 10 на мілілітр (IMO, 2004). Тепер, коли Міжнародна конвенція з управління баластними водами повністю ратифікована, існує нагальна потреба в тому, щоб судна планували встановлення систем очищення баластних вод, а регуляторні органи планували імплементацію Конвенції з управління баластними водами в своє національне законодавство і програми інспекцій державного портового контролю.

Мета статті. Мета даної статі полягає у проведенні аналізу роботи систем очищення баластних вод, виявленні основних показників, за якbми можна контролювати ступінь очищення та впровадження заходів та рекомендацій щодо поліпшення моніторингу баластних вод.

Основна частина. Системи очищення баластних вод призначені для зменшення кількості живих організмів, що скидаються в баластні води. Таке зменшення кількості цих організмів допоможе знизити ризик створення життєздатних популяцій у нових водоймах. Щоб переконатися, що системи очищення працюють належним чином після встановлення на судні, можна збирати та аналізувати зразки оброблених баластних вод, а також відстежувати конкретні робочі параметри системи очищення, щоб опосередковано перевірити, чи досягає система очищення запланованих рівнів на постійній основі [5].

Вимірювання ефективності очищення баластних вод може включати різні методи, починаючи від відбору проб баластних вод для аналізу на наявність цільових організмів і закінчуючи моніторингом робочих параметрів технологій очищення, щоб переконатися, що вони не виходять за встановлені межі. Системи моніторингу можуть також включати функції, що забезпечують автоматизовану роботу і сигналізацію, а також звітність і реєстрацію даних для забезпечення безперервної роботи очисних систем відповідно до специфікацій виробника. Будемо вважати, що існують наступні категорії моніторингу:

- фізичні/хімічні показники ефективності очищення;
- біологічні показники перевищень;
- моніторинг баластних вод на наявність залишкових біоцидів та похідних біоцидів.

Моніторинг фізико-хімічних показників ефективності очищення. Фізичні/хімічні показники ефективності очищення можуть бути використані для перевірки того, що система очищення баластних вод працює відповідно до вимог виробника. Більшість систем очищення

баластних вод мають обладнання для контролю і самодіагностики, наприклад, датчики, які безперервно вимірюють параметри очищення для перевірки ефективності. Датчики, які зазвичай входять до складу найбільш поширених систем, включають витратоміри, датчики pH, датчики розчиненого кисню, окислювально-відновлюваного потенціалу (ОВП) і амперометричні (TRO) датчики, а також он-лайн аналізатори хлору. Всі ці лічильники і датчики мають широке застосування в галузі водопостачання та очищення стічних вод і доступні в готовому вигляді у багатьох великих постачальників обладнання. Інші системи очищення баластних вод забезпечуються вимірювальними приладами або наборами, такими як портативні монітори хлору і розчиненого озону, для перевірки адекватних рівнів хімічних реагентів, які підтримуються в баластних танках. Оператори суден можуть контролювати і записувати ці дані, а також здійснювати коригування, обслуговування або ремонт системи обробки баластних вод, щоб забезпечити належне функціонування обладнання. У табл. 2.1 наведено передбачуване контрольне обладнання та потенційні метрики моніторингу та звітності для фізичних/хімічних показників за технологією очищення.

Системи очищення баластних вод проектуються і виготовляються з різними датчиками та іншим контрольним обладнанням для автоматичного моніторингу та регулювання умов експлуатації системи, щоб забезпечити належну роботу і попередити персонал судна про необхідність втручання, технічного обслуговування або ремонту. Датчики та інше контрольне обладнання, з'єднані з моніторинговим обладнанням для реєстрації робочих параметрів, також допомагають операторам суден визначати тенденції даних, забезпечуючи при цьому механізм для перевірки постійного дотримання вимог. Посібник з експлуатації та технічного обслуговування постачальника зазвичай визначає відповідні датчики та інше контрольне обладнання для системи очищення баластних вод, діапазон стабільних умов експлуатації системи, фактори, які можуть впливати на умови експлуатації, і будь-які коригування, необхідні для досягнення або підтримання стабільних умов експлуатації.

Таблиця 1. **Контрольне обладнання та потенційні показники моніторингу**

Тип технології	Вимірювання	Датчик контролю потенціалу	Обладнання або процедура	Можливі показники, що підлягають звітуванню
1	2	3	4	5
Алкіламіни	pH	pH-датчик	pH	показання pH
	Алкіламіни	Хімічний аналіз і моніторинг обробки	-Концентрація алкіламінів при впорскуванні -Дозування і використання алкіламінів	-Концентрація алкіламінів у зразках -Дозування і використання алкіламінів
Хлору-вання: електроліз або додавання хлору (наприклад, гіпохлорит або діоксид хлору діоксид)	Окислювально-відновлювальний потенціал (ОВП)	Датчик ОВП	ОВП при впорскуванні	Показання ОВП
	Загальний вміст залишкових окислювачів (TRO)	Показання амперометричного датчика	TRO при впорскуванні	Показання TRO

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
	Хлор	Онлайн N,N діетил-п фенілен діаміну (DPD) датчик, зразок аналіз та обробка моніторинг	-Концентрація хлору при впорскуванні - дозування та використання хлору (якщо додавання хлору)	-Показання хлору з обох датчиків, як з датчика, так і зі зразка в режимі онлайн аналіз -дозування та використання хлору (якщо додавання хлору)
Нагрівання	Температура	Термістор	Температура обробки	Показання температури
Озон	ОВП	Датчик ОВП	ОВП при впорскуванні	Показання ОВП
Фільтрація	Чистота води	Оглядове скло, зразок води, датчик мутності	Прозорість фільтрованої води	Показання чистоти
UV та UV+TiO	Споживання потужності, напруги і току	Діагностика живлення системи	Споживання потужності УФ-модуля, напруги і струму	Споживання потужності УФ-модуля, напруги і струму

Очікується, що моніторинг і реєстрація системи будуть безперервними під час скидання.

Якщо спрацьовує аварійна сигналізація або якщо датчики показують, що система очищення баластних вод не функціонує належним чином, дотримання обмежень на скид не може бути гарантоване. Щоб забезпечити якість стічних вод, що відповідає вимогам безпеки судна і екіпажу, судна не повинні скидати баластну воду під час тривоги або в аварійних ситуаціях і повинні відновити скидання тільки після усунення проблем з системою і відновлення стабільних умов експлуатації.

Планове технічне обслуговування системи очищення баластних вод і процедури усунення несправностей, як правило, визначені в інструкції з експлуатації та технічного обслуговування системи, що зберігається на борту судна. Всі роботи з технічного обслуговування, пов'язані з системою моніторингу баластних вод і блоком управління скиданням за борт, можуть бути записані, а інформація може зберігатися на борту судна для цілей інспекції. Крім того, навчання суднового персоналу може включати ознайомлення з експлуатацією та обслуговуванням обладнання для контролю та моніторингу скидання баластних вод за борт. Системи очищення баластних вод можна перевіряти щомісяця для визначення короткострокових і довгострокових потреб у технічному обслуговуванні, як зазначено в посібнику з експлуатації та технічного обслуговування постачальника.

Моніторинг біологічних індикаторів перевищень. Біологічні індикатори ефективності очищення - це оцінки кількості живих організмів або біомаси у стічних баластних водах після очищення, незалежно від виду. Метою моніторингу біологічних показників є вимірювання кількості живих організмів або біомаси в невеликому об'ємі очищеної баластної води. Якщо в невеликому об'ємі баластної води спостерігається значна кількість живих організмів або біомаси, то система очищення баластної води, швидше за все, неефективна, і моніторинг великих об'ємів очищеної баластної води для підрахунку кількості конкретних організмів не має особливого значення. У табл 2.1 наведені можливі показники ефективності очищення для моніторингу відповідності біологічних показників, які можуть слугувати непрямими вимірами кількості живих організмів, що залишилися в баластній воді після очищення.

При відборі проб баластної води для підрахунку живих організмів слід дотримуватися обережності. Наприклад, для вимірювання організмів розміром від 10 до 50 мікрон на рівні 0,01 особини на мілілітр необхідні зразки об'ємом до 6 000 літрів (USEPA, 2010a). Через великі обсяги проб, необхідних для аналізу, і очікувані витрати при підрахунку великих організмів, самостійний моніторинг шляхом підрахунку великих класів живих організмів у баластній воді може бути дорогим, а знайти достатню кількість кваліфікованих науковців і лабораторій може бути складно.

Моніторинг баласту на наявність залишкових біоцидів. Деякі системи очищення баластних вод виробляють або використовують біоциди (наприклад, діоксид хлору) для зменшення кількості живих організмів, присутніх у резервуарі для баластних вод. Наприклад, Агентство з охорони навколишнього середовища Сполучених Штатів Америки (EPA) вимагає, щоб у будь-якій технології обробки баластних вод не використовувався біоцид, який є "пестицидом" у розумінні Федерального закону про інсектициди, фунгіциди та родентициди, якщо тільки цей біоцид не був зареєстрований для використання в обробці баластних вод відповідно до цього закону. Крім того, EPA вимагає, щоб судна, які використовують активні речовини, проводили додатковий моніторинг як умову отримання дозволу.

Щоб переконатися, що судна не скидають шкідливих кількостей активних речовин, для тих суден, які мають системи очищення баластних вод, що додають або генерують біоциди для очищення (наприклад, хлор, діоксид хлору, озон тощо), судно повинно проводити моніторинг скидання баластних вод на наявність залишкових біоцидів. Наприклад, якщо при обробці баластних вод як біоцид використовується хлор, судновласник/оператор судна може перевірити наявність залишкового хлору в баластних водах судна. Для перевірки концентрації залишкових біоцидів у баластних водах оператори суден можуть спочатку відібрати кілька проб протягом перших кількох місяців експлуатації системи (наприклад, 3-5 проб протягом 3 місяців), а потім продовжувати відбирати додаткові проби щороку (наприклад, 2-4 проби на рік), щоб переконатися, що рівень залишкових біоцидів не перевищує допустимі норми скидання.

Усі відбори проб і тестування на залишкові біоциди слід проводити з використанням достатньо чутливих методів щоб гарантувати отримання високоякісних даних. Датчики або інше випробувальне обладнання, яке безперервно контролює залишкові біоциди у баластних водах, що скидаються, повинні бути достатньо чутливими для вимірювання концентрацій біоцидів до і після будь-якого процесу нейтралізації для перевірки концентрацій у скиданнях і контролю дози нейтралізатора.

Впровадження системи моніторингу баластних вод. Моніторинг якості роботи системи очищення баластних вод (BWTS) зазвичай проводиться тільки в інститутах під час тестування будь-яких систем-кандидатів. Відбір проб є звичайним методом моніторингу, а новітні технології відбору проб скорочують час, необхідний для проведення якісного аналізу. Зразки на суднах, що прибувають, відбираються якраз під час досліджень, щоб з'ясувати потенційну небезпеку для води, що досліджуються.

Досвід відбору проб якості вантажу на різних продуктових танкерах і танкерах-хімовозах свідчить про проблеми, пов'язані з якістю рідин. Існує багато суднових процесів, які доводять провину власників судноплавних компаній або постачальників вантажу в портах навантаження, коли якість наливного вантажу була визнана неналежною.

Час, необхідний для якісного аналізу наливних вантажів у лабораторії, становить від 3 до 7 годин, іноді навіть більше.

Що стосується моніторингу якості BWTS, очікується, що час, необхідний для якісного аналізу зразків баластної води в будь-якій лабораторії, буде однаковим. Все це - втрати часу, яких можна було б уникнути завдяки використанню нової технології.

Всі постачальники і продавці нових моделей BWTS (21 винахідник моделей BWTS має підтвердження сертифікату схвалення ІМО до серпня 2011 року) заявляють, що їхні моделі стійкі до морської солоної води і до умов сильного хвилювання на морі. Але немає жодних доказів цієї стійкості протягом 10 або 20 років. Інший досвід показує, що всі суднові трубопроводи і системи ходових механізмів пошкоджуються під впливом моря і умов експлуатації судна протягом багатьох років. Це також є причиною необхідності моніторингу, окрім інших причин, пов'язаних з якістю обробки.

Система очищення баластних вод, як правило, включає блок для видалення великих (органічних) частинок і блок дезінфекції залишків. Найчастіше це фільтр з розміром комірок 20-50 мк, а два основних типи дезінфекційних установок використовують ультрафіолетове опромінення або виробляють реактивний хлор. Монітор BW складається з двох датчиків: один для моніторингу частинок і, отже, ефективності роботи фільтра, а другий - для вимірювання флуоресценції хлорофілу, тобто індикатора життєздатних водоростей і ефективності процесу дезінфекції. Монітор BW працює без додавання хімічних речовин або маніпуляцій з відібраними зразками в баластній лінії (in-line) і надає оператору або майстру миттєвий (своєчасний) аналіз і результати. Він може вимірювати і повідомляти про продуктивність попередньої обробки і ефективність дезінфекційної установки вчасно для повторного запуску, ремонту або повторної обробки. У разі несправності він миттєво подає сигнал тривоги і може миттєво попередити оператора. Датчики BW-монітора розташовані в двох положеннях: до і після блоків попередньої обробки та дезінфекції.

Монітор BW-монітор відображає і зберігає дані на борту, дозволяючи капітану судна або судновласнику використовувати їх для оцінки ефективності системи управління баластними водами (СУБВ). Коли даних стане багато, це дасть змогу розвивати потенціал прогнозного технічного обслуговування, що також представляє великий інтерес для виробника BWMS. Очевидно, що державний портовий контроль, який повинен перевіряти відповідність системи управління водними ресурсами, може використовувати ці дані, щоб переконатися, що не відбувається грубого перевищення критеріїв життєздатності. Хмарний центр обробки даних також пропонується як опція, що забезпечує як механізм резервного копіювання, так і комбінований аналіз продуктивності СУБ з плином часу, аналіз продуктивності декількох ідентичних систем або різних систем за схожих умов.

Система BW-монітора складається з декількох індивідуально виготовлених частин, які призначені для моніторингу, аналізу та відображення стану монітора. Схема на рис. 1 показує розташування наступних компонентів системи:

- Data-HUB - концентратор HMI І місце керування
- два датчики BW-монітора
- інтерфейс вводу-виводу - інтерфейс вводу-виводу, який збирає дані з різних датчиків, встановлених на борту (наприклад, температура, TRO, солоність, геопозиція, робота BWMS).

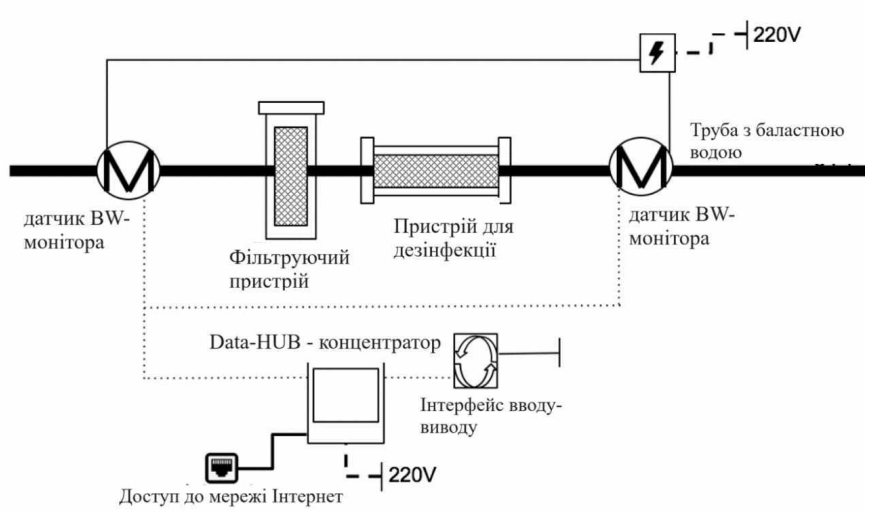


Рисунок. 1 – Схема встановлення системи BW-моніторингу

Модель моніторингу. Важливо з'єднати блок датчиків з хорошим передавальним блоком, який пересилає виявлені дані в наземний віддалений офіс. Люди в цьому офісі можуть дистанційно запускати систему на судні і зупиняти роботу після завершення виявлення. Капітан судна або старший помічник капітана спостерігатиме за роботою системи на моніторі у вантажній рубці або на навігаційному містку, якщо там є відповідна індикація. Всі згадані дії можуть бути легко і просто попередньо розраховані звичайним способом, який також є комп'ютеризованим.

Можливість такого супутникового зв'язку між судном і віддаленим офісом вже існує, і вона використовується в усьому світі для дистанційного обслуговування (рис. 2).



Рисунок.2 – Схема пропонованого дистанційного моніторингу

Кваліфікована сервісна команда підключається до суднових систем за допомогою супутникового зв'язку та аналізує несправності. Акредитований технічний спеціаліст може дистанційно підключитися до судна для перевірки, аналізу, усунення несправностей та вжиття подальших заходів до наступного візиту в порт.

Висновки. Проведений аналіз показує на актуальність і необхідність контролю за різноманітними аспектами баластних вод, охоплюючи як інвазійні види, так і фізико-хімічні показники ефективності очищення та наявність залишкових біоцидів. Важливо враховувати широкий спектр параметрів для повноцінної оцінки якості баластних вод.

Дистанційний моніторинг баластних вод, доступний за допомогою існуючих технічних засобів, визначається як ефективний і безперервний метод. Це забезпечить суднам можливість підтверджувати чистоту баластної води при входженні у порти, уникнувши витрат часу на відбір проб і проведення аналізів. Цей підхід сприятиме ефективній і стандартизованій процедурі контролю якості баластних вод та сприятиме підтримці екологічних стандартів у морській індустрії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hurley, W., Schilling, S.S, and Mackey, T. (2001). Contract Designs for Ballast Water Treatment Systems on Container Ship R.J. Pfeiffer and Tanker Polar Endeavor. Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS). Arlington, VA. June 1, 2001.

2. International Maritime Organization (IMO). (2008). Resolution Marine Environmental Protection Committee (MEPC) 174(58), Guidelines for Approval of Ballast Water Management Systems (G8).

3. Global Maritime Transport and Ballast Water Management Issues and Solution, Dr. Matej David Stephan Gollasch, , Springer, Hamburg, Germany, 2023, VII, 335 p.

4. Monitoring of Ballast Water Quality, Ministry of Environment and Food of Denmark Environmental Protection Agency, report, 2019, 38 p

5. Contract Designs for Ballast Water Treatment Systems on Container Ship R.J. Pfeiffer and Tanker Polar Endeavor. Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS). Arlington, VA. June 1, 2001.

6. Albert, R.J., Lishman, J.M., Saxena, J.R.: “Ballast Water Regulations and the move toward concentration-based numeric discharge limits”, Ecol Appl 23(2), pp.289-300, 2013.

7. Голуб'ятників Н. І. Захист водойм від забруднення при судноплавстві / Н. І. Голуб'ятників / Одеса: Фенікс, 2009. – 430 с.

8. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Логінов О.В., Щербина О.В. (2022). Огляд процесу модернізації та оснащення суден системами очищення баластних вод. Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки. - 33 (72) № 5 – С. 299-304. DOI:https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/46

9. O. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mykhailova, I., Obnyavko, T., & Korobko, T. (2023). Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects. Transport Development, (1(16), 164-174. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13

10. Melnyk, O., Sagaydak, O., Shumylo, O., Lohinov, O. (2023). Modern Aspects of Ship Ballast Water Management and Measures to Enhance the Ecological Safety of Shipping. Studies in Systems, Decision and Control, vol 481, 681-694. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_39

Bulgakov M., Burlachenko D., Nykytyuk P, Shcheniavskyi G., Kucherenko V.

INNOVATIVE APPROACHES TO BALLAST WATER MANAGEMENT ON SHIPS THROUGH REMOTE MONITORING AND QUALITY CONTROL

The growth of maritime activities and cargo transportation leads to a significant release of ballast water into the environment. This causes serious environmental problems, as thousands of species of aquatic organisms are transported through ballast water, along with other forms of pollution. This

article discusses the importance of ballast water control and management by evaluating different monitoring methods. In particular, the possibilities of using remote monitoring technologies to avoid delays associated with water samples when ships enter a port are considered. The article analyzes various approaches to monitoring, considers schemes for installing additional nodes, operation and processing of the information received. The introduction of advanced technologies for remote monitoring of ballast water will save time for ships by bypassing the need to collect and analyze ballast water samples before the start of cargo operations in the port, which will lead to optimization of the time previously spent on these processes, contributing to the efficiency and speed of ship handling in the port.

Keywords: *ballast water treatment system, monitoring, sensor, biological indicators, BW-monitor*

REFERENCES

1. Hurley, W., Schilling, S.S., & McKee, T. (2001). Contract designs of ballast water treatment systems on the container ship R.J. Pfeiffer and the tanker Polar Endeavor. Marine environmental engineering technologies symposium (MEETS). Arlington, VA. June 1, 2001.

2. International Maritime Organization (IMO). (2008). Marine Environment Protection Committee (MEPC) Resolution 174(58), Guidelines for the approval of ballast water management systems (G8).

3. Global maritime transport and ballast water management, problems and solutions, Dr. Matei David Stefan Gollasch, , Springer, Hamburg, Germany, 2023, VII, 335 pp.

4. Ballast water quality monitoring, Ministry of Environment and Food Denmark Environmental Protection Agency, report, 2019, 38 p.

5. Contract designs for ballast water treatment systems on the container ship R.J. Pfeiffer and the tanker Polar Endeavor. Marine Environmental Engineering Technologies Symposium (MEETS). Arlington, VA. June 1, 2001.

6. Albert, R.J., Lishman, J.M., Saxena, J.R.: 'Ballast Water Regulations and the move towards concentration-based numeric discharge limits', Ecol Appl 23(2), pp.289-300, 2013.

7. Golub'yatnikiv N. I. Zakhist water vid obstruction in ship navigation / N. I. Golub'yatnikiv / Odessa: Fenix, 2009. - 430 c.

8. Melnyk O.M., Voloshin A.O., Onishchenko O.A., Loginov O.V., Shcherbina O.V. (2022). Review of the process of modernization and equipping ships with ballast water treatment systems. Vcheni zapiski TNU im. Vernadskyi. Technichni nauki. - 33 (72) № 5 - С. 299-304. DOI:https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/46

9. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mikhailova, I., Obnyavko, T., & Korobko, T. (2023). Targeted research on technological innovation in the shipping industry: review and perspectives. Transportation Development, (1(16), 164-174. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13

10. Melnyk, O., Sagaidak, O., Shumylo, O., Lokhinov, O. (2023). Modern aspects of ship ballast water management and measures to improve environmental safety of shipping. Research in Systems, Decisions and Control, Vol. 481, 681-694. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_39

УДК 621.311.243 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22

Яремчук С.О., Маслов І.З.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ НА СУДНІ: ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ТА АНАЛІЗ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) щодо скорочення шкідливих викидів з суден протягом останніх років суттєво посилюються. У порівнянні з TIER I діючі вимоги TIER III є жорсткішими більш ніж у п'ять разів. Використання суднових фотоелектричних систем (photovoltaic systems, PVS) дозволить зменшити споживання палива, витрати, шкідливі викиди, та залежність від традиційних джерел енергії. Використання суднових PVS є затребуваним і перспективним напрямком, однак наразі їх впровадження залишається обмеженим. Судновласники та екіпажи морських суден не мають достатньої теоретичної і практичної підготовки щодо впровадження PVS в процес експлуатації на суднах. Мета роботи – поглибити знання та підвищити фахові компетентності здобувачів вищої освіти у галузі морського транспорту щодо техніко-економічних характеристик суднових PVS шляхом проведення лабораторного дослідження, і аналізу інформації, отриманої з наукових джерел, та за допомогою системи штучного інтелекту ChatGPT. Встановлено теоретичні засади фізичного явища p-n переходу в основі фотодіодів, що застосовуються в PVS. Проведений фізичний експеримент з моделюванням вольт амперної характеристики діоду з p-n переходом. Визначено перелік суднових приладів різноманітної функціональності з використанням p-n переходу, місця встановлення PVS на судні, ККД, фактори впливу на ефективність, кількісні показники економії палива та викидів CO_2, термін повернення інвестицій, особливості та проблеми широкого впровадження, перелік рекомендацій ТО та ремонту, перелік чинників та кількісні показники зниження вартості PVS, актуальні напрямки розвитку. Розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS. За результатами роботи встановлено підвищення рівня фахових компетентностей здобувачів в області суднових PVS, сформовано практичні навички використання системи ChatGPT. Сонячна енергія наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих суднах для забезпечення освітлення, пристроїв зв'язку та навігаційної системи. Найбільш перспективний напрямок розвитку– це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності СЕУ. Широкому впровадженню суднових PVS перешкоджають високі капітальні витрати, невисокий ККД, обмежена площа встановлення.

Ключові слова: *сонячна енергія, p-n перехід, фотодіоди, сонячні панелі, фотоелектрична система, суднова енергетична установка, штучний інтелект, здобувачі освіти.*

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

На даний час водний транспорт є одним із найважливіших видів транспорту для світової торгівлі. За оцінками експертів, на нього припадає приблизно 90% світової торгівлі. Галузь судноплавства стала одним із учасників глобальних викидів парникових газів (ПГ), які на даний момент становлять приблизно 3% від загального глобального обсягу[1]. Глобальна індустрія судноплавства стикається з величезним тиском щодо скорочення викидів ПГ, оскільки Міжнародна морська організація (ІМО) запровадила суворі правила щодо зменшення викидів ПГ із суден. Доповнення ІМО до Міжнародної конвенції щодо запобігання забруднення з суден (MARPOL), стосовно викидів оксидів азоту (NOx) і сірки (SOx), значно впливають на експлуатацію суден протягом останніх років [2]. Порівняльний аналіз TIER I (2000 рік) та діючих вимоги TIER III (2016 рік) показав, що вимоги підвищились більше ніж в 5 разів (рис. 1).

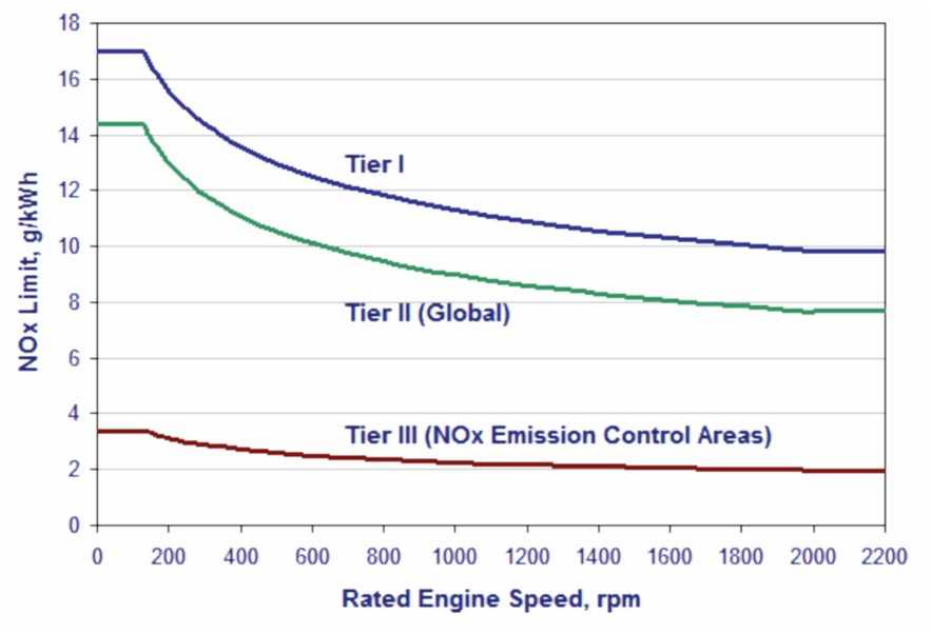


Рис. 1. Графіки обмеженнь викидів NOx у Додатку VI MARPOL

Енергія сонячного світлового випромінювання може стати прийнятним рішенням для екологічного морського судноплавства завдяки свої перевагам - цей ресурс є нескінченним, відновлюваним та екологічно чистим.

Одним із найпоширеніших застосувань сонячної енергетики є фотоелектричні системи (photovoltaic systems, PVS), які перетворюють сонячне світлове випромінювання на електричну чи теплову енергію. Завдяки використанню PVS на суднах можливе зменшення споживання палива і залежності від традиційних джерел енергії, та скорочення ПГ з суден. Слід підкреслити, що PVS на суднах все ще вважаються новітнім рішенням, і широко не використовуються. Більшість комерційних суден, в тому числі великі вантажні судна, танкери та пасажирські судна, наразі не застосовують PVS для своїх енергетичних потреб.

Необхідність зменшення ПГ є проблемою дуже актуальною, та потребує від судновласників більш активної роботи по встановленні PVS на суднах для виконання посилених вимог ІМО щодо викидів. У процесі дослідження виявлена суперечність, яка полягає в тому, що не зважаючи на те, що використання PVS на суднах є затребуваним і перспективним напрямом для зменшення викидів з суден, однак впровадження PVS залишається обмеженим з причин, що судновласники та екіпажи морських суден не мають достатньої теоретичної і практичної підготовки щодо впровадження PVS в процес експлуатації на суднах.

Проблему ми бачимо у розриві між невідкладною потребою встановлення PVS на суднах, та незначним відсотком їх фактичного впровадження. На нашу думку, один із можливих шляхів подолання проблеми — це підвищення фахових компетентностей здобувачів вищої освіти у сфері морської інженерії шляхом здобуття більш ґрунтовних знань щодо суднових PVS. Існує необхідність в проведенні дослідження, спрямованого на поглиблення знань та зростання свідомості здобувачів в галузі морського транспорту, а також екіпажів суден та судновласників, стосовно потенціалу суднових PVS. Поглиблення знань можливе шляхом лабораторного дослідження здобувачами фізичного явища, що лежить в основі перетворення сонячної енергії на електричний струм, та аналітичного дослідження інформації з новітніх джерел щодо екологічних переваг, техніко-економічних характеристик та особливостей, класифікації, розробки рекомендацій з технічного обслуговування (ТО), проблем застосування та напрямів розвитку суднових PVS. Такий підхід надає здобувачам можливість активно приймати участь у

дослідженні, а отримані знання сприятимуть зростанню свідомості майбутніх морських фахівців щодо переваг PVS, та поширенню використання на морському транспорті.

2.Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, і на які спираються автори.

Для перетворення сонячної енергії на електричний струм PVS використовують фотодіоди з *p-n* переходом, який виникає в області контакту напівпровідників *p*- та *n*-типу всередині монокристала напівпровідника. В основі *p-n* переходу лежить фізичне явище домішкової провідності напівпровідників, докладно описане в навчальному посібнику [2].

Електропровідність напівпровідників може бути обумовлена як власними електронами атомів даної речовини (власна провідність), так і електронами домішкових атомів (домішкова провідність). Домішки діляться на донори та акцептори. Донори мають валентність більшу, ніж валентність основних атомів напівпровідника, і створюють електронну провідність (провідність *n*-типу) [2, с. 366]. Акцепторні домішки мають валентність на одиницю меншу, ніж атоми кристала напівпровідника, і створюють діркову провідність (провідність *p*-типу) [2, с. 368].

На границі контакту напівпровідників *p*- і *n*-типу виникає особлива область, що її називають *p-n* переходом. Потік основних носіїв струму через *p-n* перехід являє собою дифузійний струм $I_{диф}$. Одночасно з рухом основних носіїв через *p-n* перехід виникає рух неосновних носіїв (електрони із напівпровідника *p*-типу переходять в напівпровідник *n*-типу, а дірки переходять в протилежному напрямку). Потік неосновних носіїв через *p-n* перехід створює дрейфовий струм $I_{др}$.

В роботі [3, с. 184] описані дифузійний струм $I_{диф}$, дрейфовий струм $I_{др}$, та результуючий струм через *p-n* перехід. В умовах рівноваги результуючий струм дорівнює нулю $I=I_{диф} + I_{др}=0$. Зовнішня напруга, прикладена до *p-n* переходу, порушує ця рівновагу, результуючий струм у цьому випадку залежить від напряму прикладеної напруги. Якщо до *p-n* переходу прикладена напруга *U* у напрямку, що збігається з контактною різницею потенціалів («+» прикладено до *n*-напівпровідника, «–» прикладено до *p*-напівпровідника – рис. 2, *а*), концентрація основних носіїв в області *p-n* переходу зменшується. Такий напрям прикладеної напруги має назву «запираючий». Це приводить до різкого зменшення дифузійного струму. При $I_{диф}\to 0$ через *p-n* перехід протікає тільки дрейфовий струм, який при кімнатній температурі дуже незначний, оскільки він обумовлений концентрацією неосновних носіїв струму.

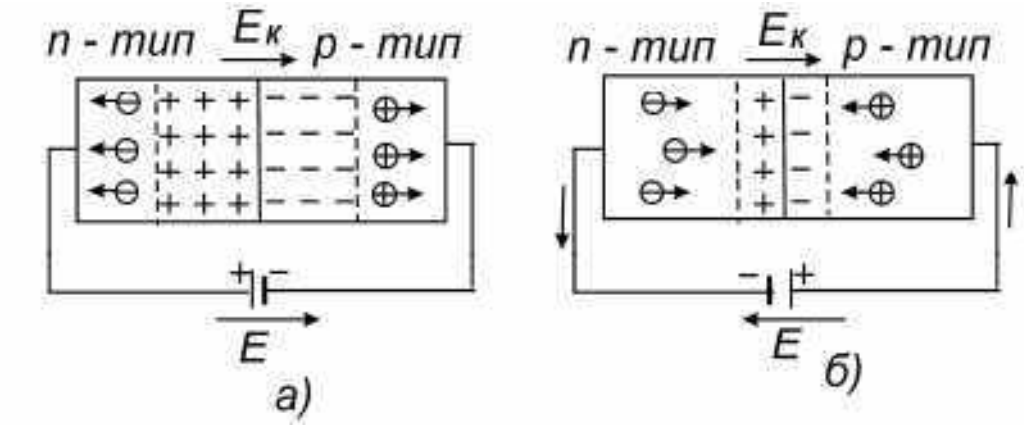


Рис. 2. Напрям руху носіїв струму при зміні зовнішньої напруги, прикладеної до p-n переходу

Інша ситуація виникає, коли зовнішня напруга спрямована назустріч контактній різниці потенціалів (рис. 2, *б*). У цьому випадку концентрація основних носіїв струму в перехідному шарі зростає, і сила струму з ростом напруги буде зростати за експоненціальним законом. Залежність сили струму від прикладеної напруги через *p-n* перехід (вольт-амперна характеристика, ВАХ) описується формулою:

$$I = I_0 \exp(\pm eU / kT - 1) \quad (1)$$

де I_0 – значення, до якого наближається струм в запираючому напрямку при збільшенні (за абсолютною величиною) запираючої напруги. У запираючому напрямку в показнику експоненти слід вибирати знак "–" а в пропускному "+". Таким чином, *p-n* перехід має односторонню провідність — в пропускному напрямку сила струму значно більша в порівнянні з запираючим напрямком.

Введення в чистий напівпровідник домішкових атомів дуже істотно впливає на електричні властивості напівпровідника. Так, наприклад, введення одного атома бору на 10^5 атомів силіцію збільшує провідність чистого силіцію в тисячі разів при кімнатній температурі [4, с. 346].

Фізичні явища, що виникають в умовах дії сильних електричних і магнітних полів на напівпровідники розглянуті в роботі [5]. Основні розрахункові формули зонної теорії твердих тіл та фізики напівпровідників приведені в роботі [6, с. 320]. *p-n* перехід лежить в основі будови багатьох сучасних напівпровідникових приладів для випрямлення і перетворення змінних струмів. Це стабілітрони, діоди та фотодіоди, фотоелементи, транзистори, будова яких докладно описана в [5]. Саме фотодіоди застосовують в суднових PVS, тому здобувачам необхідні ґрунтовні теоретичні знання явища *p-n* переходу, та його лабораторне дослідження.

Для автоматизації розрахунків експериментальних даних, та побудови вольт-амперної характеристики (ВАХ) *p-n* переходу, доцільно використати загальновідомий цифровий інструмент Google Sheets, завдяки ряду переваг цього безкоштовного табличного онлайн-редактора з потужними обчислювальними можливостями: таблиці з розрахунками автоматично зберігаються в хмарі та синхронізуються; до них можна отримати доступ з будь-якого місця з будь-якого пристрою і в будь-який час.

Крім фізичного експерименту, для розвитку фахових компетентностей здобувачам потрібна інформація з наукових джерел щодо новітніх застосувань PVS на суднах світового флоту.

В роботі [1] автори розглядають досягнутий прогрес щодо інтеграції джерел сонячної енергії в суднові енергетичні системи, починаючи від технічних принципів і закінчуючи подальшими розвитком. В цій роботі детально викладено основні робочі теорії нових джерел енергії, методи застосування, основні технології та приклади застосувань на суднах. Сонячна енергія, як основне джерело енергії наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих суднах для забезпечення освітлення, пристроїв зв'язку та навігаційної системи. З огляду на невисоку щільність потужності сонячної енергії, дослідники вважають за необхідне комбінувати сонячну енергію, енергію вітру та паливні елементи, щоб покращити загальну вихідну потужність. На думку авторів, найбільш перспективний напрямок розвитку застосування нових джерел енергії на судні – це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності суднової енергетичної установки (СЕУ). Гібридна суднова енергетична система заснована на традиційній судновій енергетичній системі, інтегрованій з двома або більше новими джерелами енергії, такими як сонячна енергія, енергія вітру та паливні елементи.

В роботі [7] автори розглядають основні компоненти суднової PVS, та фактори впливу на її ефективність. Це наявність сонячного випромінювання в зонах експлуатації судна, достатні площі на судні для розміщення PVS, техніко-економічна ефективність системи, енергоефективність, витрати на паливо та інвестиційні витрати. В статті показаний план розміщення PVS на палубі невеликого контейнеровозу довжиною 123 м, дедвейт 6479 т, головний двигун 5400 кВт. В статті зроблено розрахунки техніко-економічних показників PVS з рухом судна між портами північної та західної Африки. Автори встановили, що для подачі 24 кВт електроенергії споживачам на борту, потрібно встановити 740 модулів SPV панелей на площі 1300 м^2. Освітлена зона палуби судна обмежується розмірами судна і вантажними потребами. Наявна площа палуби в модельному судні становить не більше 700 м^2, тому розрахунки зроблено для потужності 12 кВт. Сонячна енергія такої потужності може бути надійною альтернативою корабельному аварійному джерелу живлення для забезпечення

аварійного освітлення, приладів навігації, радіообладнання та системи сигналізації. Враховуючи 300 днів сонячного випромінювання в рік, економія може сягати 17 тон важкого палива і 172 тон CO_2. Крім екологічних переваг, економія витрат на паливо протягом року складатиме приблизно $ 10.200. Враховуючи, що гарантійний термін PVS-модулів становить 25 років, батареї 5 років, інверторів та іншого обладнання мінімум 10 років, встановлено, що загальні інвестиції на PVS-модулі будуть повернуті протягом максимум 10 років. Однак потужність суднової PVS системи ще недостатня порівняно із загальною потребою енергії судна, і зниження витрат палива та викидів ПГ відповідно не є значним.

В роботі [8] автори встановили, що невеликі судна виключно на енергії сонця мають середні розміри 18,7 м × 6,3 м, з площею PVS-панелей близько 84,5 м^2 з номінальною потужністю 16,6 кВт і ємністю акумулятора 197 кВт-год. Доведено, що використання сонячної енергії на великих суднах зменшує споживання палива до 8 т/добу, зменшує викиди з потенційним скороченням CO_2 до 12%, а також в глобальному масштабі зменшує витрати на паливо близько 5 млн. доларів/рік, або 100 млн. доларів за 20 років роботи. Проблеми полягають в технічних та економічних аспектах: існує потреба в сонячних батареях з високою ефективністю перетворення та широкомасштабним додатком зберігання, та більш високі капітальні витрати, ніж традиційна генерація енергії на суднах. Нечасті приклади використання сонячної енергії на великих суднах пояснюються також недостатньою площею поверхні на судні для розміщення PVS-панелей. Загалом будь-яка альтернативна енергія може бути включена в суднову енергетичну систему. Інтеграція системи генерації енергії з нових джерел з існуючими судновими енергосистемами є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності, надійності електромереж та якості електроенергії на борту, і буде в центрі уваги майбутніх досліджень.

В роботі [9] автори зазначають, що через обмеження ефективності перетворення сонячної енергії, для суден, які мають відносно великі потреби в електроенергії та обмежену площу установки PVS-панелей, сонячну енергію потрібно поєднувати з дизельним двигуном або іншими джерелами енергії. Автори розробили гібридну енергетичну систему, що складається з сонячної енергії, дизель-генераторів, акумуляторів, інверторів, системи керування батареями і системи управління енергією, заснованої на енергетичній системі судна «COSCO Tengfei». Це судно має загальну довжину 182,80 м, ширину 32,20 м, глибину 14,95 м, осадку 9,40 м, швидкість 20 вузлів і дальність руху 20 000 миль. Це океанське судно, призначене для перевезення 5000 транспортних засобів, стало першим у світі великомасштабним вантажним судном, яке використовує сонячну енергію, а також має найбільшу у світі площу панелей великомасштабної PVS (пікова потужність 143 кВт).

В роботі [10] автори аналізують технічні аспекти PVS-панелей, переваги, недоліки, вартість та проблеми встановлення на судні. Найбільш технологічним рішенням у суднобудуванні вважається використання суднових комбінованих систем з поєднанням вітрогенераторів та PVS. В цьому випадку функціональні можливості системи можуть бути суттєво розширеними.

В роботі [11] автори розглядають принципи встановлення, ТО та ремонту PVS, типи пошкоджень та термін служби. Широке використання PVS у складі СЕУ має великі перспективи, оскільки забезпечує мінімізацію трудових ресурсів для обслуговування, фінансових витрат на паливо, та значне зниження забруднення повітряних та водних сфер. На даний час існує стійка тенденція до поширення застосування PVS на флоті. Однак наразі технологічний рівень не дозволяє PVS створити альтернативу традиційним джерелам енергії. PVS найближчим часом не зможуть скласти конкуренцію традиційним джерелам енергії навіть у окремих нішах судноплавства. Основними недоліками PVS слід визнати велику вартість та не завжди високу продуктивність. Разом із вдосконаленням технологій компанії – виробники мають вирішувати проблеми витоку токсичних речовин при пошкодженні PVS, та їх утилізації після закінчення терміну експлуатації.

Аналіз робіт [1, 7-11] показав, що в останні роки дослідники в усьому світі провели велику кількість досліджень PV систем, в тому числі використання систем на комерційних суднах на північно-західному маршруті Чорноморського басейну. Ці результати показують, що для генерації більшої потужності на різних широтах і кліматичних умовах потрібна гнучка система регулювання оптимального куту нахилу PVS-панелей.

Після огляду наукових робіт нерозглянутими залишились питання щодо типів та видів PVS, коефіцієнта корисної дії (ККД), особливостей, переваг, проблем встановлення та ТО, кількісних показників вартості, ефективності інвестицій та напрямів розвитку PVS-панелей. Для динамічного та ефективного пошуку актуальної інформації щодо суднових PVS здобувачам було запропоновано використати ChatGPT - системи штучного інтелекту (ШІ), яка базується на алгоритмах глибокого навчання [12]. В процесі уточнення запиту якість відповіді покращується, тому система здатна стати дієвим, швидким та ефективним помічником. Однак існує застереження - використання ChatGPT як єдиного джерела інформації в академічних умовах не рекомендується, а отриману інформацію слід перевіряти на основі більш достовірних джерел. З урахуванням застережень, можливостей ChatGPT цілком достатньо для отримання потрібної інформації. На наш погляд, для здобувачів немає кращого способу освоїти сучасний інструмент ШІ, ніж почати працювати з ним під час фахової підготовки.

Таким чином, розв'язання проблеми, що полягає у розриві між невідкладною потребою встановлення PVS на суднах, та невеликим відсотком їх реального застосування, є актуальною крос-дисциплінарною задачею при підготовці фахівців сфери морської інженерії, та обумовлює мету та завдання роботи.

Мета роботи – поглибити знання та підвищити фахові компетентності здобувачів освіти у галузі морського транспорту щодо техніко-економічних характеристик суднових PVS шляхом проведення лабораторного дослідження, аналізу інформації з наукових джерел, та інформації, отриманої за допомогою ChatGPT. Для досягнення мети роботи необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести фізичний експеримент, побудувати та аналізувати ВАХ *p-n* переходу в фотодіодах, які застосовуються в суднових PVS;

2. За допомогою ChatGPT отримати інформацію щодо характеристик, та потенціалу суднових PVS;

3. Виконати аналіз інформації, розробити багатоаспектну класифікацію та перелік рекомендацій з технічного обслуговування суднових PVS;

4. Визначити техніко-економічні особливості, проблеми та напрями розвитку суднових PVS-панелей.

3. Основний матеріал.

Лабораторне дослідження було виконано курсантами Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» під керівництвом викладачів на заняттях з фахових дисциплін та факультативних заняттях з науково-дослідної роботи курсантів. Фізичний експеримент був проведений в лабораторії фізики з використанням лабораторної установки, схема якої зображена на рис. 3.

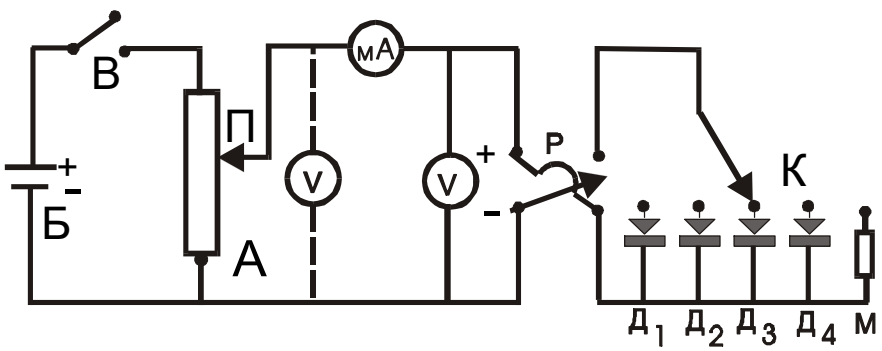


Рис. 3. Схема експериментальної лабораторної установки:

Б - джерело постійної напруги, В – вимикач, П – дільник напруги для плавного регулювання напруги, V- високоомний вольтметр, мА– міліамперметр, Р – двох полюсний перемикач для зміни напрямку струму, К – комутатор для увімкнення в ділянку одного з діодів p-n переходом Д чи металевого опору М

Лабораторний експеримент був проведений за наступною методикою:

Крок 1. Здобувачі визначили верхню межу інтервалу напруги у пропускному напрямку, та поділили інтервал напруги [0, $U_m^{пр}$] на п’ять значень.

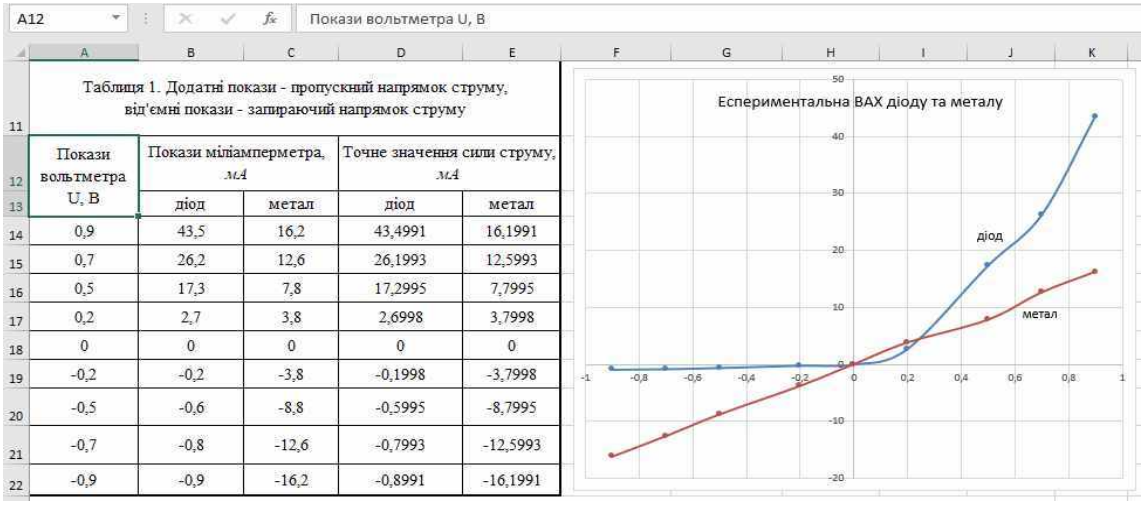
Крок 2. Здобувачі визначили верхню межу інтервалу напруги у запираючому напрямку, та поділили інтервал напруги [0, $U_m^{зап}$] на п’ять значень.

Крок 3. Для цих значень напруги здобувачі виміряли відповідні значення струмів в пропускному та в запираючому напрямках для діода з p-n переходом (рис. 4). Результати вимірів занесли в таблицю, представлену на рис.5.



Рис. 4. Курсанти Дунайського інституту НУ «Одеська морська академія» під час виконання фізичного експерименту

Крок 4. Комутатором К здобувачі перемкнули ділянку на металевий опір М, та виміряли відповідні значень струму спочатку в пропускному, а потім у запираючому напрямках для металу. Результати вимірів занесли в таблицю на рис.5.



Таблиця 1. Додатні покази - пропускний напрямок струму, від'ємні покази - запираючий напрямок струму

Покази вольтметра U, В	Покази міліамперметра, мА		Точне значення сили струму, мА	
	діод	метал	діод	метал
0,9	43,5	16,2	43,4991	16,1991
0,7	26,2	12,6	26,1993	12,5993
0,5	17,3	7,8	17,2995	7,7995
0,2	2,7	3,8	2,6998	3,7998
0	0	0	0	0
-0,2	-0,2	-3,8	-0,1998	-3,7998
-0,5	-0,6	-8,8	-0,5995	-8,7995
-0,7	-0,8	-12,6	-0,7993	-12,5993
-0,9	-0,9	-16,2	-0,8991	-16,1991

Рис. 5. Таблиця даних з розрахунками та експериментальні графіки ВАХ діоду з p-n переходом та металу, побудовані здобувачами в Google Sheets

Крок 5. Здобувачі виконали розрахунки за допомогою Google Sheets. За отриманими значеннями сили струму та напруги здобувачі побудували експериментальні графіки ВАХ діоду з *p-n* переходом і металу (рис. 5), вважаючи пропускний напрямок додатнім за абсцисою, а запираючий напрямок від'ємним.

Аналіз графіків показав суттєве збільшення електропровідності діоду з *p-n* переходом в порівняні з металом у пропускному напрямі, та доцільність застосування *p-n* переходу в фотодіодах PVS-панелей.

Наступним кроком дослідження було завдання здобувачам отримати інформацію щодо застосування PVS за допомогою ChatGPT. На цьому етапі дослідження здобувачі зареєструвались на ресурсі [12], та в процесі спілкування з ШІ отримали нову інформацію, яка була перевірена на основі навчальних посібників [2-6], наукових джерел [1, 7-11] та визнана достовірною. Результати загального обговорення та аналізу інформації показали, що елементи з *p-n* переходом використовуються у складі суднових приладів різноманітної функціональності, зображених в діаграмі на рис. 6.

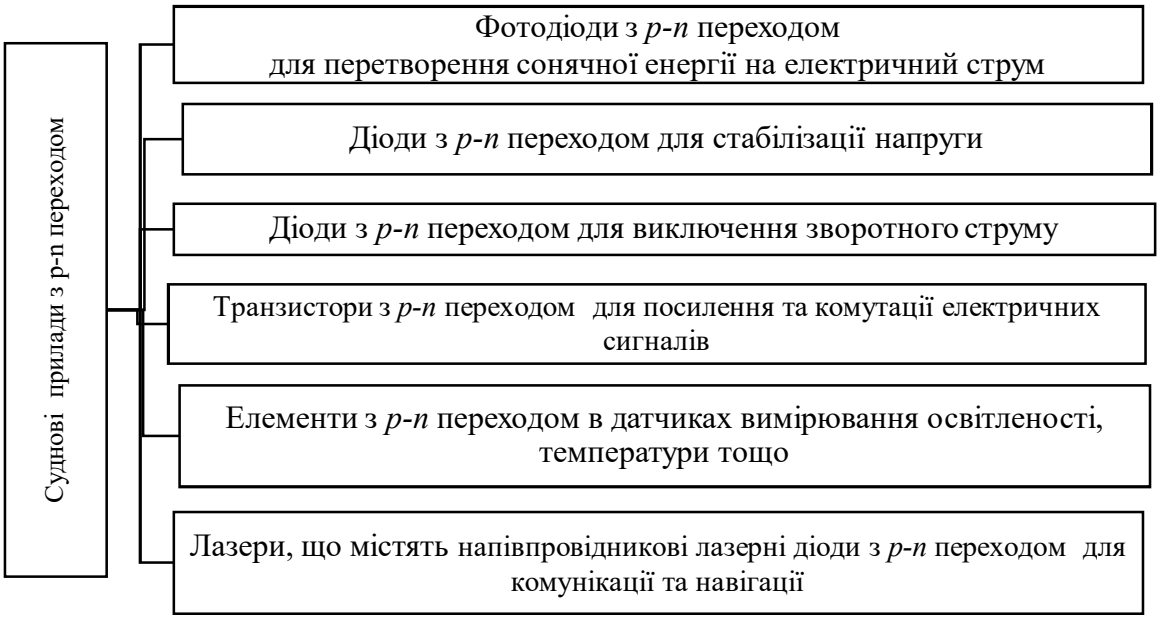


Рис.6. Діаграма суднових приладів з p-n переходом

Встановлені основні техніко-економічні характеристики суднових PVS-панелей. ККД панелей з кремнієвих фотодіодів зазвичай коливається в межах від 15% до 20%. В PVS-панелях, що використовують фотодіоди з арсеніду галію (GaAs), ККД може досягати 20% - 25%. Нові дослідження вказують на досягнення ККД > 25% для певних типів фотодіодів. В суднових PVS-панелях використовуються кристалічні силіконові монокристалічні (Monocrystalline Silicon, Mono-Si) або полікристалічні (Polycrystalline Silicon, Poly-Si) фотодіоди завдяки їх ефективності та довговічності. Місця встановлення PVS залежать від конструкції судна, розміру панелей, потреб в енергії та ергономіки судна. Це може бути палуба, надбудова, борт судна, мачта. Аналіз дозволив виділити характерні особливості суднових PVS, методи та засоби їх забезпечення, зображені в діаграмі на рис. 7.

За результатами аналізу встановлені проблеми використання суднових PVS:

- Забруднення. Панелі можуть забруднюватися внаслідок накопичення солі, пилу, пташиного посліду тощо, що призводить до зниження ефективності панелей;
- Корозія. Морська вода та повітря містять велику кількість солей, які спричинюють корозію металевих частин, електричні контактів, рам, кріплень;
- Механічні пошкодження. Удари, поштовхи, хвилі або падіння предметів на поверхню панелей може призвести до тріщини, ламання частин або пошкодження панелей, та зниження їх функціональності;

- Тіньові ефекти. На морських суднах можуть бути присутні об'єкти, які створюють тінь, що знижує вироблення електроенергії;

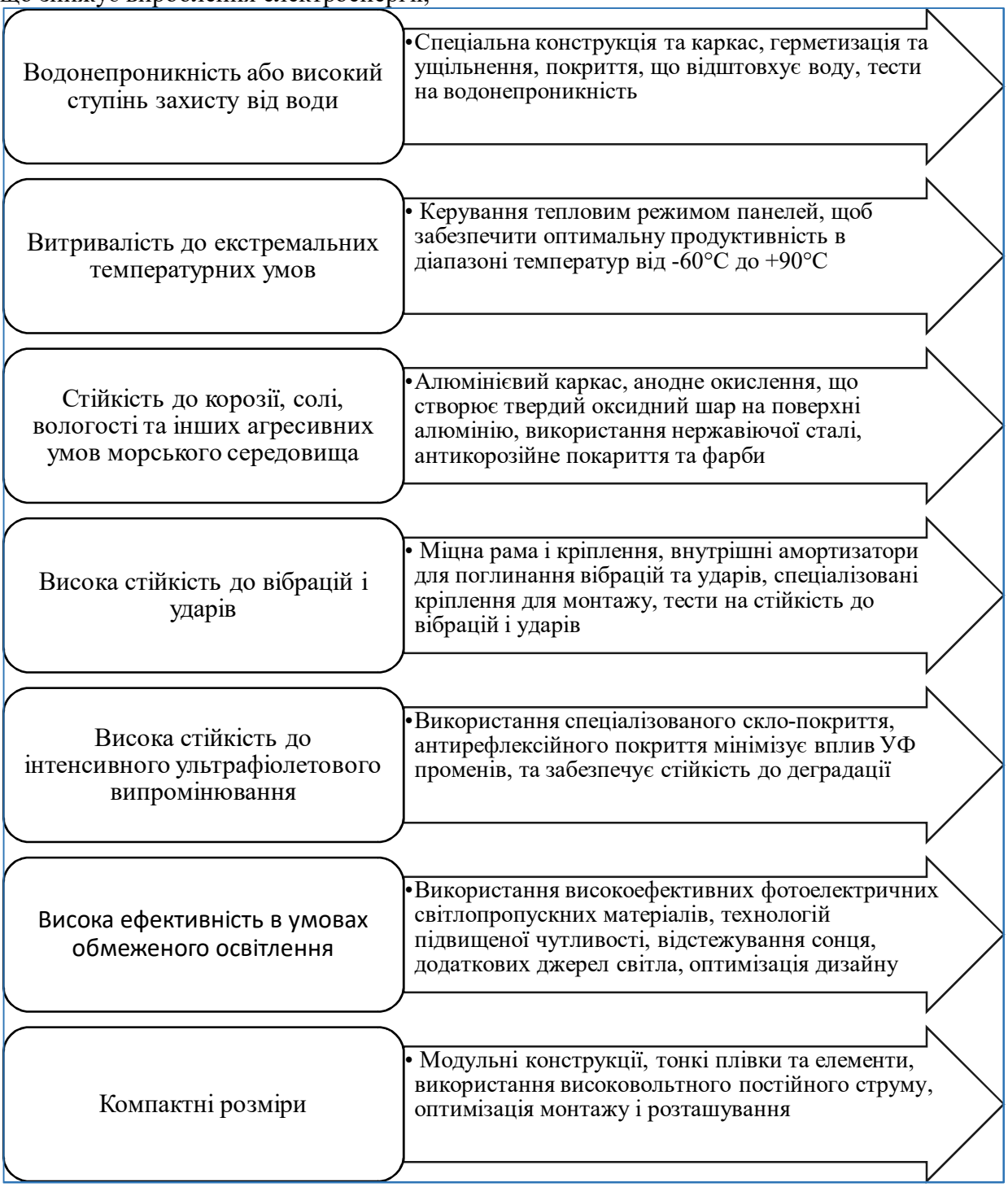


Рис. 7. Діаграма особливостей суднових PVS, методів та засобів їх забезпечення

- Втрати продуктивності внаслідок зношення. Вплив солі, води і ультрафіолетове випромінювання прискорює процес старіння панелей, та впливає на їх довговічність та продуктивність;
- Висока вартість. PVS можуть бути відносно дорогими, особливо якщо вони спеціально виготовлені для використання на морських суднах з урахуванням специфічних вимог та норм безпеки.

За результатами аналізу було розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS, представлену в табл. 1.

Таблиця 1. Класифікаційна матриця суднових PVS

Ознака класифікації	Типи та види
1. Потужність PVS	PVS з низькою потужністю використовуються для живлення невеликих електричних пристроїв або бортових систем
	PVS з високою потужністю використовуються для живлення електромоторів, систем кондиціювання повітря та інших потужних систем
2.Ефективність PVS	Висока ефективність з високим ККД > 25%
	Середня ефективність з помірним 15% < ККД < 25%
	Низька ефективність з низьким ККД < 15%
2. Тип PVS-панелей	Монокристалічні. Виготовлені з одного кристалу кремнію, відрізняються високою ККД і ефективністю при низькій освітленості
	Полікристалічні. Виготовлені з кількох кристалів кремнію, що мають нерегулярну структуру. Вони менш ефективні, але мають нижчу вартість
	Тонкі плівкові. Виготовлені з тонких шарів напівпровідників, таких як аморфний кремній або кадмієвий телуровий, і мають гнучку структуру
4. Місце розташування PVS-панелей	Розміщуються на верхньому покритті судна, що забезпечує максимальну експозицію до сонячного світла
	Розміщуються на бортах судна, це вигідно для суден, які часто мають бокове розташування до сонця
5. Вбудована інтеграція PVS-панелей	Структурна інтеграція. PVS є частиною структури судна, палуби або покриття. Вони виконують функцію не тільки зарядки акумуляторів та/або живлення електричних систем, але й фізично підсилюють частину судна
	Віконна інтеграція. PVS розташовуються на ілюмінаторах судна, дозволяючи одночасно фільтрувати світло та генерувати електроенергію
6. Зовнішня інтеграція PVS панелей	Додаткове обладнання: PVS встановлюються як додаткове обладнання на зовнішній частині судна на кронштейнах. Вони не є частиною структури судна, однак забезпечують додатковий джерело енергії
	Плаваючі панелі. PVS розташовуються на спеціальних плавучих платформах або структурах, які плавають у воді біля судна. Вони пов'язані з судном за допомогою кабелів для передачі згенерованої електроенергії
7.Монтажна система PVS-панелей	Фіксовані панелі, що закріплюються на судні у фіксованому положенні
	Рухомі панелі з системою відстеження положення сонця
8. Матеріал каркасу PVS-панелей	Алюмінієвий каркас
	Каркас з нержавіючої сталі
	Каркас з композитних матеріалів

По результатам аналізу сформовано перелік рекомендацій щодо технічного обслуговування (ТО) та ремонту суднових PVS:

1. Щоденна перевірка. Необхідно регулярно перевіряти стан PVS, виявляти пошкодження, забруднення, відновлювати оптимальну експозицію до сонячного світла;

2. Перевірка кабелів і з'єднань. Необхідно перевіряти кабелі та з'єднання між панелями, контролером заряду та акумуляторами, і переконатися, що всі з'єднання щільні, немає корозії або ослаблення затяжки;

3. Моніторинг продуктивності. Необхідно слідкувати за продуктивністю PVS за допомогою моніторингової системи, та швидко виявляти проблеми або несправності;

4. Ремонт та заміна. В разі виявлення пошкоджень або несправностей слід діяти відповідно до рекомендацій виробника. Це може включати ремонт або заміну пошкоджених частин, таких як фотодіоди, кабелі, з'єднання тощо;

5. Регулярний сервіс. Залежно від вимог виробника та експлуатаційних умов, рекомендується проводити регулярний сервіс PVS на судні. Це може включати ТО, перевірку та налаштування системи;

6. Безпека. Необхідно пам'ятати про безпеку при ТО та ремонті PVS на судні, виконувати необхідні заходи безпеки, включаючи відключення електроживлення, якщо це необхідно, і застосовувати засоби захисту від ураження електричним струмом.

За результатами аналізу встановлено залежність вартості PVS від кількох ключових чинників: потужність, тип панелі, розмір та кількість панелей, виробник, необхідність додаткового обладнання, регіональні фактори. Залежність вартості від регіону може бути пов'язано з рівнем конкуренції на ринку, доступністю субсидій або безподаткових кредитів, витратами на транспортування тощо. Аналіз показав суттєве зниження вартості PVS за останні десять років завдяки факторам, показаним в діаграмі на рис. 8.

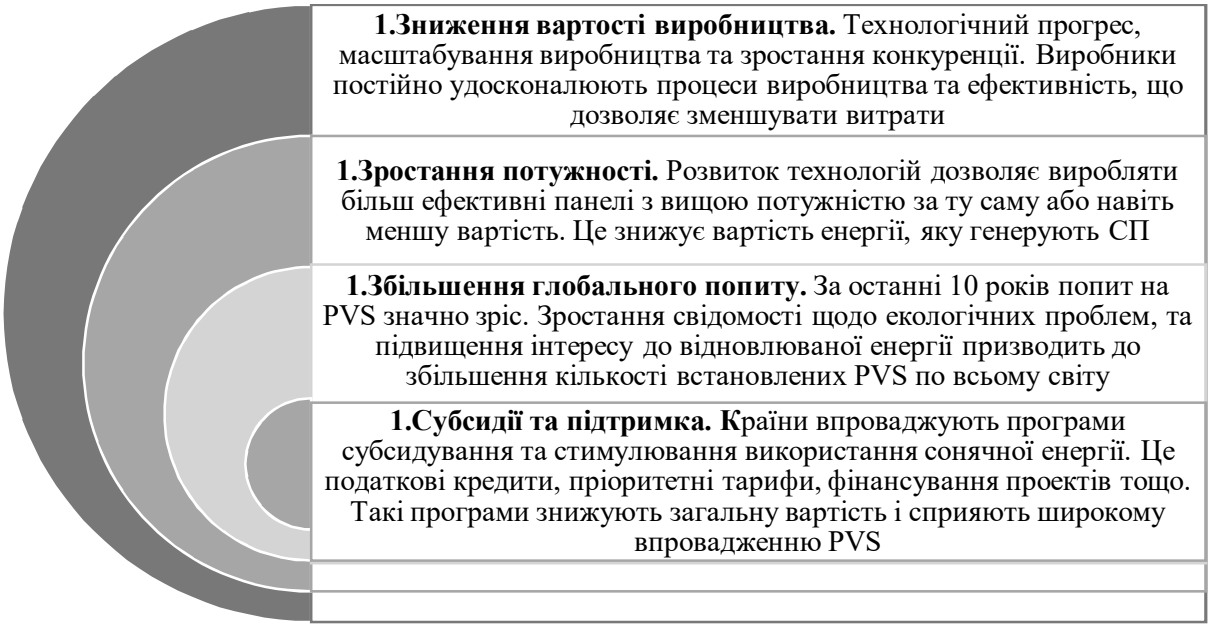


Рис. 8. Діаграма факторів зниження вартості PVS

Один з прикладів зниження вартості PVS демонструє продукт Tesla Solar Roof. У 2017 році компанія Tesla оцінила вартість Solar Roof на рівні $21,85 за квадратний фут. У 2021 році завдяки оптимізації виробництва та впровадженню нових технологій компанія знизила вартість Solar Roof до $8,50 тобто за чотири роки розвитку вартість зменшилась в 2,57 раз.

Компанії, які займаються дослідженнями в області суднових PVS, компанії-виробники, та компанії, що спеціалізуються на морських технологіях та енергетиці, об’єднуються з метою збільшення фінансування нових розробок.

Це компанії Норвегії, Нідерландів, Японії, США, Німеччини, де технологія PVS широко використовується, та отримує підтримку з боку уряду та приватних інвестицій. Актуальні напрямки розвитку суднових PVS зображені в діаграмі на рис. 9.

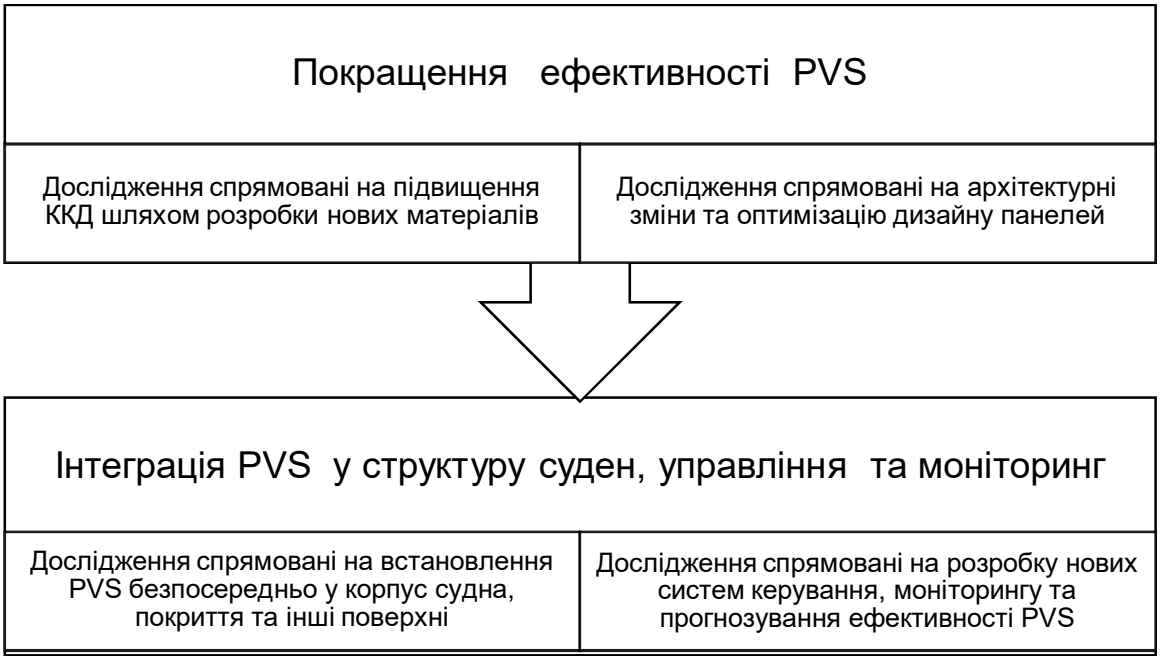


Рис. 9. Діаграма напрямів розвитку суднових PVS

За результатами тестування знань здобувачів з теми суднових PVS, проведеного після лабораторного та аналітичного дослідження, було встановлено підвищення:
1) абсолютної успішності (відношення кількості здобувачів, що успішно виконали тестові завдання за темою, до загальної кількості здобувачів) на 17%;
2) якості навчання (відношення кількості здобувачів з оцінкою «добре» та «відмінно» до загальної кількості здобувачів) на 13,8%.

Висновки. Проведений аналіз дозволив визначити теоретичні засади фізичного явища *p-n* переходу в основі фотодіодів, що застосовуються в PVS. Проведений фізичний експеримент з моделюванням ВАХ діоду з *p-n* переходом. Проведено аналіз інформації з наукових джерел та інформації, отриманої за допомогою ChatGPT та визначено:

– Перелік суднових приладів різноманітної функціональності з використанням *p-n* переходу, ККД PVS на кремнієвих фотодіодах та фотодіодах з арсеніду галію, місця встановлення PVS на судні;

– Фактори впливу на ефективність суднових PVS, кількісні показники економії палива та викидів CO_2, термін повернення інвестицій;

– Проблеми: невисокі ефективність перетворення та потужності зберігання, високі капітальні витрати, недостатня площа поверхні на судні для встановлення PVS-панелей;

– Особливості та проблеми використання PVS, перелік рекомендацій для ТО та ремонту суднових PVS;

– Перелік чинників та кількісні показники зниження вартості суднових PVS, актуальні напрямки розвитку суднових PVS.

Розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS. Норвегія, Нідерланди, Японія та США виокремлені як країни, де технології PVS стрімко розвиваються завдяки підтримці з боку уряду та приватних компаній.

Сонячна енергія, як основне джерело енергії наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих суднах для забезпечення освітлення, пристроїв зв’язку та навігаційної системи. Найбільш перспективний напрямок розвитку

застосування нових джерел енергії на судні – це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності СЕУ. Наведений приклад гібридної СЕУ на судні «COSCO Tengfei», що складається з PVS, дизель-генераторів, акумуляторів, інверторів, системи керування батареями, та системи управління енергією.

Використання сонячної енергії на великих суднах зменшує споживання палива до 8 т/добу, зменшує викиди з потенційним скороченням CO_2 до 12%, а також в глобальному масштабі зменшує витрати на паливо близько 5 млн. доларів/рік, або 100 млн. доларів за 20 років роботи.

За результатами тестування знань здобувачів з теми суднових PVS було встановлено підвищення рівня знань та фахових компетентностей. Під час роботи з ChatGPT у здобувачів сформовано практичні навички використання систем ШІ, та визначені його переваги та недоліки, які свідчать про неможливість використання без контролю людини в складних соціотехнічних системах.

В роботі застосований крос-дисциплінарний підхід, який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, фахових дисциплін морської інженерії, інформаційних технологій, та системного аналізу. Подальша робота буде спрямована на дослідження та апробацію робіт в напрямку розробки системи моніторингу та прогнозування ефективності PVS.

ЛІТЕРАТУРА

1. P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, “Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 144, April 2021, 111048, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048.

2. Emission Standards. IMO Marine Engine Regulations. URL: https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php (дата звернення 01.10.2023)

3. Михайленко В.І., Білоус В.М., Поповський Ю.М. Загальна фізика: Навчальний посібник. – Друге видання, перероблене та доповнене – Одеса: ВидавІнформ ОНМА, 2012. – 475 с.

4. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т.: навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 2. Електрика і магнетизм. / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 2001. – 452 с.

5. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т.: навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 3. Оптика. Квантова фізика. / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. – 520 с.

6. Фізика напівпровідників. (Частина І) [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / В. І. Ільченко, Т. Ю. Обухова.; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.– 26 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf

7. A. Aijjou, L. Bahatti, and A. Raihani. Influence of Solar Energy on Ship Energy Efficiency: Feeder Container Vessel as Example. International Journal of Electrical Energy, Vol. 7, No. 1, 2019, p. 21-25. doi: 10.18178/ijoee.7.1.21-25

8. Tuswan Tuswan1, Saefulloh Misbahudin, Sony Junianto and others. Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. The 3rd Maritime Safety International Conference (MASTIC) 2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1081 (2022) 012011. doi:10.1088/1755-1315/1081/1/012011

9. Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, Q. Li, and T. Long, “A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship,” Energy, vol. 165, pp. 965–978, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.085.

10. Яремчук С. О., Григорович Н. Р. Аналіз техніко-економічних аспектів застосування сонячних панелей на судні. Сучасні підходи до високоефективного використання

засобів транспорту : матеріали XIII Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р. – Запоріжжя : АА Тандем, 2022. С. 172-176. DOI: 10.13140/RG.2.2.16687.41120

11. Григорович Н. Р. Технічні аспекти обслуговування та ремонту сонячних панелей на судні. Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VII Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 21-22 квітня 2023р. - Запоріжжя: АА Тандем, 2023. С.111-115.

12. Welcome to ChatGPT. URL: https://chat.openai.com/ (дата звернення 01.10.2023)

REFERENCES

1. P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, “Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 144, April 2021, 111048, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048 [in English].

2. Emission Standards. IMO Marine Engine Regulations (2023). Retrieved from: https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php [in English].

3. Mihajlenko, V.I., Bilous, V.M., Popovskij, Yu.M. (2012). General Physics: Tutorial [Zagalna fizyka: Navchalnyj posibnyk]. – Second edition, revised and supplemented – Odesa: VydavInform ONMA, 475 p. [in Ukrainian].

4. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T. (2001). General physics course in 3 volumes: textbook for students of higher technical and pedagogical institutions of education. Volume 2. Electricity and magnetism. [Zahalnyi kurs fizyky u 3 tomakh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh tekhnichnykh i pedahohichnykh zakladiv osvity. Tom. 2. Elektryka i mahnetyzm]. / Edited by I.M. Kucheruk. – Kyiv: Technique, 452 p. [in Ukrainian].

5. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T. (1999). General physics course in 3 volumes: textbook for students of higher technical and pedagogical institutions of education. Volume 3. Optics. Quantum physics. [Zahalnyi kurs fizyky u 3 tomakh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh tekhnichnykh i pedahohichnykh zakladiv osvity. Tom. 3. Optyka. Kvantova fizyka]. / Edited by I.M. Kucheruk. – Kyiv: Technique, 520 p. [in Ukrainian].

6. Ilchenko, V.I., Obukhova, T. Yu. (2020) Physics of semiconductors. (Part I) [Electronic resource]: a textbook for students of specialty 153 "Micro and nano system technology" [Fizyka napivprovidnykiv. (Chastyna I) [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 153 «Mikro ta nano systemna tekhnika»]. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 26 p. [in Ukrainian]. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf

7. A. Aijjou, L. Bahatti, and A. Raihani. Influence of Solar Energy on Ship Energy Efficiency: Feeder Container Vessel as Example. International Journal of Electrical Energy, Vol. 7, No. 1, 2019, p. 21-25. doi: 10.18178/ijoee.7.1.21-25 [in English].

8. Tuswan Tuswan1, Saefulloh Misbahudin, Sony Junianto and others. Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. The 3rd Maritime Safety International Conference (MASTIC) 2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1081 (2022) 012011. doi:10.1088/1755-1315/1081/1/012011 [in English].

9. Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, Q. Li, and T. Long, “A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship,” Energy, vol. 165, pp. 965–978, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.085 [in English].

10. Yaremchuk, S.O., Hryhorovych, N. R. (2022). Analysis of technical and economic aspects of the application of solar panels on the ship [Analiz tekhniko-ekonomichnykh aspektiv zastosuvannia soniachnykh panelei na sudni]. Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means", Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, December 8-9, 2022. Zaporizhzhya: AA Tandem, P. 172 – 176 [in Ukrainian].

11. Yaremchuk, S.O., Hryhorovych, N. R. (2023). Technical aspects of maintenance and repair of solar panels on the ship [Tekhnichni aspekty obsluhovuvannia ta remontu soniachnykh panelei na sudni]. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference «Innovative approaches

to the development of competence of specialists in the conditions of professional formation», Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, April 21-22, 2023. Zaporozhye: AA Tandem, P.111-115 [in Ukrainian].

12. Welcome to ChatGPT (2023). Retrieved from: https://chat.openai.com/ [in English].

Yaremchuk S. O., Maslov I. Z.

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ON SHIPS: PHYSICAL EXPERIMENT AND ANALYSIS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

In recent years, the International Maritime Organization (IMO) has significantly strengthened requirements to reduce harmful emissions from ships. Compared to TIER I, the current TIER III requirements are more than five times tougher. The use of marine photovoltaic systems (PVS) will reduce fuel consumption, the costs and harmful emissions, the dependence on traditional energy sources. The use of ship PVS is a popular and promising direction. However, at present their implementation remains limited. Shipowners and crews of marine vessels do not have sufficient theoretical and practical training to implement PVS in the process of the operation on ships. The purpose of the article is to deepen the knowledge and improve the professional competence of higher education applicants in the field of maritime transport regarding the technical and economic characteristics of marine PVS by conducting laboratory research, and analyzing information obtained from scientific sources, and using the artificial intelligence system ChatGPT. The theoretical foundations of the physical phenomenon of p-n transition have been established in the basis of photodiodes used in PVS. A physical experiment was conducted with modeling volts of the ampere characteristic of the diode with a p-n transition. The list of ship instruments of various functionality using the p-n transition, the place of installation of PVS on the ship, efficiency factors, quantitative indicators of fuel economy and CO2 emissions, the return-on-investment period, features and problems of wide implementation, the list of maintenance and repair recommendations, the list of factors and quantitative indicators of PVS cost reduction, actual directions of development are determined. A multi-aspect classification matrix of marine PVSs has been developed. According to the results of the work, an increase in the level of professional competence of applicants in the field of ship PVS was established, practical skills of using the ChatGPT system were formed. Currently, solar power is used for the movement of small vessels, and as an auxiliary source of energy on large ships to provide lighting, communication devices and a navigation system. The most promising direction of development is hybrid solutions of several types of energy to increase the capacity of the ship's power plant. High capital costs, low efficiency, limited installation area prevent the widespread introduction of marine PVS.

***Keywords**: solar energy, p-n transition, photodiodes, solar panels, photovoltaic system, marine power plant, artificial intelligence, applicants for education.*

УДК 656.61 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.23

Старцев О. М., Крамаренко В. В., Червоний О.Д.

СТРУКТУРИ І ЗМІСТ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РІВЕНЬ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА НА МОРСЬКОМУ ТА ВНУТРІШНЬОМУ ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ

В даній роботі проведено аналіз сучасних досліджень присвячених вивченню складових безпеки судноплавства, а саме - факторів, що впливають на її рівень, розроблено низку структур та сформульовано завдання забезпечення її безпечного функціонування. Дано визначення безпеці судноплавства як комплексу заходів що включає науку, знання та практику, які дозволяють здійснювати переходи суден по акваторіях між визначеними портами, забезпечуючи їм належний рівень безпеки при прийнятих критеріях та обмеженнях. Запропоновано напрям подальшого дослідження впливу цих факторів на морську безпеку.

Автори статті в ході дослідження дійшли до висновку що фактори, які впливають на рівень безпеки судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті, можуть й повинні і далі уточнюватись, доповнюватися в міру поглиблення досліджень. Чим докладніше враховується вплив факторів, тим точніше можна отримати кількісні показники безпеки. Безпеку судноплавства можна визначити кількома способами. У цій статті подано структуровані фактори, що впливають на безпеку судноплавства, які пропонується для подальшого дослідження визначати за характером: технічним, організаційним, психофізіологічним, зовнішнім або віднести до чинника який має вплив на довкілля.

У минулому багато питань безпеки судноплавства вирішувалися законодавством. І, безумовно й безсуперечно, це хороший спосіб. Але перегляд питань, пов'язаних з безпекою на морі, повинен включати продовження досліджень в таких сферах: втома моряка, стрес, здоров'я, обізнаність про ситуацію, командна робота, прийняття рішень, комунікація, обмін інформацією, технологічний розвиток, цифровізація, автоматизація, вплив на довкілля та, перш за все, культура безпеки.

Ключові слова: *забезпечення безпеки судноплавства, безпечна експлуатація суден, морський та внутрішній водний транспорт, безпека мореплавання, фактори безпеки судноплавства.*

Постановка проблеми. Багаторічний досвід освоєння людством Світового океану свідчить, що мореплавання пов'язане з численними та різноманітними за природою небезпеками. Проблема забезпечення безпеки судноплавства є однією з найважливіших на морському транспорті, так як від її успішного рішення залежить охорона життя та здоров'я членів екіпажів суден і пасажирів, збереження самих транспортних засобів, перевезених на них вантажів [6] і вплив на довкілля. Поступово у світовому судноплавстві було сформовано сукупність нормативно-інформаційних документів у вигляді міжнародних Конвенцій, кодексів та керівництв, що регламентують різні аспекти безпечної експлуатації суден, постійно ведуться дослідження науковцями в цій галузі.

Безпека судноплавства (БС) - стан збереження (захищеності) людського здоров'я і життя, довкілля та майна на морі й на внутрішніх водних шляхах; відсутність неприпустимого ризику, пов'язаного з загибеллю або травмуванням людей, заподіянням шкоди довкіллю або матеріальних збитків [1]. Робота з забезпечення безпеки судноплавства заснована на виконанні міжнародних конвенцій, вимог національного законодавства та спрямована на підвищення

рівня безпеки мореплавання та запобігання аварійності суден, удосконалення державного нагляду за торговим мореплаванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню питань факторів, що впливають на БС присвячено багато праць вітчизняних та іноземних вчених, серед яких варто відзначити: Махмурова-Дишлюк О.П. [2], Крамський С.О., Кудлай І. В., Цуканов О.Ю. [4], Гончаров В.О., Геоня Е.Р. [5], Джунусова Д.Н. [6], Загородня Ю., Лисий А. [7], Зайцева Т.В., Кравцова Л.В., Терещенкова О.В. [8], Шумілова К.В., Онищенко О.А. [9], K. Formela, T. Neumann, A. Weintrit [10], A. Joseph, D. Dalaklis [11], G. Mavrogenis [15].

Метою статті є розгляд та дослідження факторів, що впливають на рівень безпеки судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті, їх структуризація та актуалізація даної проблеми щодо подальшого більш предметного вивчення кожної структури (групи) факторів окремо.

Основні результати дослідження. На виконання поставленої задачі, розгляд в документах та наукових публікаціях факторів, що впливають на рівень безпеки судноплавства, а саме умовного розподілу їх по групах, дозволив визначити зміст цих факторів та сформувати їх в структури.

Метою забезпечення безпеки судноплавства є стійке та безпечне функціонування морського транспортного комплексу; захист інтересів особи, суспільства та держави, а також об’єктів та суб’єктів морської транспортної інфраструктури та споживачів транспортних послуг. Однак обмежені ресурсні можливості, а також домінуючі комерційні інтереси посилюють ризик аварій та подій на морському транспорті.

Судноплавні компанії приділяють недостатньої уваги профілактичній роботі щодо зниження аварійності, працюючи в умовах жорсткої конкуренції на ринку морських транспортних послуг (відсутність стабільної вантажної бази, відносно низькі фрахтові ставки, значний податковий тягар, складні митні процедури). Причиною аварійних ситуацій і подій є мінімізація витрат судноплавних компаній на технічне переозброєння та підтримку судна, його машин, механізмів, приладів та систем у необхідному технічному стані. Вік суден також одна із причин підвищення аварійності. Існують машини (системи), які працюють на програмному забезпеченні, запрограмованому в комп'ютер, але все ж потрібна кваліфікована людина, яка його використовує. Помилка з боку цієї людини означає, що запускається вся ланцюгова реакція помилок, яка, зрештою, призводить до не дуже хорошого результату. Чи то довкілля, технологія чи вся система корабля, все зводиться до взаємодії з людським фактором.

Причиною зіткнень суден та інших навігаційних подій часто є відсутність гарної морської практики, недостатня професійна підготовка суднових екіпажів, дії берегових служб управління, неякісне технічне обслуговування та судноремонт. Причини зростання аварійності на морському флоті слід шукати в економічних, технічних, інформаційних аспектах діяльності флоту, а також у людському факторі. Однак на даний час не ясна структура та зміст факторів які впливають на безпеку судноплавства, показників й критеріїв оцінки, немає чітких методик моделювання. Тому є необхідність у розгляді та систематизації факторів, що впливають на БС.

Окремі питання безпеки судноплавства знайшли свій відбиток у низці вітчизняних законодавчих актів, як-от: Закон України «Про транспорт», Кодекс торговельного мореплавства України, Водний кодекс України, Порядок здійснення нагляду за забезпеченням безпеки руху на транспорті, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 04 березня 1997 року № 204, Положення про Державну службу морського та річкового транспорту України, затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 06 вересня 2017 року № 1095, Положення про Державну інспекцію України з безпеки на морському та річковому транспорті затверджене Указом Президента України від 08 квітня 2011 року № 447/2011, Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті затверджене наказом Міністерства транспорту України від 20 листопада 2003 року № 904.

Наступні прийняті програми визначили низку серйозних структурних перетворень морської транспортної системи України: Національна транспортна стратегія України на період

до 2030 року, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 року № 430, План заходів з реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 7 квітня 2021 року № 321.

Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі СОЛАС-74 (International Convention for the Safety of Life at Sea; SOLAS), опублікована Міжнародною морською організацією (IMO), є основним міжнародним документом з безпеки для моряків, і глава V конвенції, присвячена БС всіх суден у морі, встановлює правила ведення безпечного мореплавання.

Інші документи – це рекомендації національних, регіональних, наприклад, EMSA (European Maritime Safety Agency) і міжнародних агентств і організацій. Прикладом також є Міжнародна асоціація морських засобів навігації та маяків (IALA), яка надає своїм членам два інструменти управління ризиками: IWRAP (програма оцінки ризиків водних шляхів) та PAWSA (оцінка портів і водних шляхів) [12]. IWRAP є інструментом моделювання корисним для оцінки морських ризиків. Використовуючи IWRAP, можна оцінити частоту зіткнень і посадок на мілину на певному водному шляху на основі інформації про обсяг/склад руху та геометрію маршруту [13]. PAWSA надає оцінку ризику на визначеному водному шляху, а результат показує, чи є існуючий ризик на водному шляху прийнятним або неприйнятним [12]. Ще одна дуже активна асоціація у сфері морської безпеки – Всесвітня асоціація інфраструктури водного транспорту PIANC зі своїми технічними комісіями та робочими групами експертів.

Прикладом галузевих стандартів є Рекомендована практика управління ризиками на морі, видана Класифікаційним товариством Det Norske Veritas (DNV). Загальна мета цієї Рекомендованої практики полягає у встановленні вказівок і рекомендацій щодо процесу, необхідного для досягнення прийнятного та контрольованого рівня ризику під час морських операцій для персоналу, навколишнього середовища, активів і репутації [14]. Британські порти (Кодекс морської безпеки в портах Великої Британії), Нова Зеландія (Оцінка ризиків у портах і гаванях і система управління безпекою) і Канада (Методологія управління ризиками лоцманської проводки) є гарними прикладами внутрішніх норм для оцінки ризиків у БС. Подібних прикладів тут можна множити.

Так в документі [1] фактори, що впливають на рівень БС, умовно підрозділені на три основних групи: технічні, організаційні, психофізіологічні. До основних факторів, які прямо або непрямо впливають на рівень БС і на імовірність аварійних подій (АП) у судноплавстві, належать такі: фактори, пов’язані з окремими особами; організація на судні; умови праці і побуту на судні і на березі; фактори, пов’язані із судном; управління на березі; зовнішні впливи і довкілля. Також в документі перелічено зміст даних факторів, але за вищевказаними групами вони не розподілені.

В роботі [2] визначається, що до складових елементів БС передусім належать: інформаційні, економічні, політичні, соціальні, технологічні, екологічні та інші. Чинниками виникнення ризику при перевезеннях водним транспортом можуть стати: технічні, техногенні, людський або природні фактори.

Згідно публікації [3] Державної служби морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України ми бачимо розподіл факторів на чотири групи (причини виникнення АП): організаційні, технічні, навігаційні та психофізіологічні.

У дослідженні [4] при вивченні та аналізу факторів які впливають на безпеку мореплавання розглядаються такі аспекти: технічний – надійність (безвідмовність) судна, його систем і механізмів; економічний – скільки потрібно затратити коштів, щоб отримати достатній рівень безпеки; соціальний – укомплектованість екіпажів кваліфікованими моряками, престижність морської професії, вирішення соціальних проблем, кадрова політика, захист інтересів моряків профспілками; технологічний – порушення технологічних правил та інструкцій при перевезенні вантажу в результаті великих економічних збитків внаслідок незбереження доставки товарів і небезпеки для судна (зміщення вантажу, порушення міцності корпусу, недостатня остійність, навали, аварійні події); юридичний –

практика розслідування аварій, відповідальність і права капітана, нормативні акти з безпеки мореплавання.

В роботі [5] викладено, що у багатогранному ланцюзі факторів, що обумовлюють безпеку мореплавання, підготовка кваліфікованих екіпажів суден має значення замикальної ланки, від якої залежить і охорона людського життя, і збереження суден та вантажу, і захист та збереження морського середовища.

Джерело [6] дає визначення забезпеченню безпеки мореплавства як сукупності заходів, пов'язаних з досягненням необхідного рівня надійності та живучості судна, із зовнішніми для судна чинниками, що забезпечують безпечну діяльність судна в морі. Також автором пропонується вимоги до забезпечення безпеки мореплавання, які по суті зіставляються з факторами що впливають на БС, розділити на такі групи: вимоги до конструкції, обладнання та постачання суден; вимоги при експлуатації судна (безпечне завантаження та перевезення); вимоги до організації пошуку і рятування; вимоги до укомплектування екіпажу судна; забезпечення безпеки морського судноплавства; контроль в портах, організація розслідування аварій.

Про БС в дослідженні [10] говориться що її можна визначити як стан морської системи (судно, людина, навколишнє середовище), при якому жоден з її елементів з тієї чи іншої причини не загрожує якомусь іншому елементу системи. У морі стан небезпеки виникає в результаті морської аварії, що розуміється як небажана подія, яка завдає значних збитків і втрат (матеріальні та особисті) в результаті зіткнення або внутрішньо суперечливих взаємодій в системі: людина-об'єкт-довкілля. Автори статті [10] зазначають, що із складових морської безпеки найбільш мінливою є безпека мореплавання. Тому оцінка морської безпеки окремого судна зазвичай зводиться до оцінки його навігаційної безпеки. Безпеку на морі іноді визначають також як «такі бажані умови людської діяльності на морі, які не загрожують життю та майну людей і не є шкідливими для морського середовища». Вона складається з чотирьох компонентів, а саме: технологічна та експлуатаційна безпека суден, навігаційна безпека, безпека осіб, які зазнають лиха, і запобігання забрудненню навколишнього середовища з суден. Навігація є основним елементом складної системи безпеки на морі, пов'язаної з людським фактором. В даній роботі [10] зазначається, що вплив як на елементи системи, так і на сам процес навігації мають такі чинники:

тип, призначення та завдання судна;
морські характеристики корабля, маневреність та технічні дані;
екологічні умови акваторії, в яких судно експлуатується;
кількість членів екіпажу та їх кваліфікація.

Автори дослідження [10] підкреслюють, що серед великої кількості факторів, які впливають на рівень безпеки судноплавства, можна виділити три системи: укомплектування ходового містка (навігаційні процеси); морське середовище (рівень небезпеки); технічні та юридичні аспекти, пов'язані з процесом навігації.

У своїй праці [15] досвідчений капітан каже про те, що морська навігація складається з планування, управління та керівництва рейсом судна. Він перелічує наступні основні принципи безпечного мореплавання: розсудливе мореплавання; поінформованість про ситуацію; професійні знання та судження; застосування науки та техніки; знання та дотримання законодавства та процедур. Обширні дослідження, присвячені людським помилкам та їх наслідкам, класифікували кілька причин, які у основному призводять до будь-якої помилки, причому найчастішою причиною є втома. Підводячи підсумок автор статті [15], наводить основні причини морських аварій: втома; неадекватна комунікація (спілкування); відсутність загальних технічних знань; недостатнє знання суднової системи; помилка автоматизації.

За підсумками вище досліджених наукових робіт, можна підкреслити, що БС розглядається як комплекс заходів який включає науку, знання та практику, що дозволяє здійснювати переходи суден по акваторіях між визначеними портами, забезпечуючи їм належний рівень безпеки при прийнятих критеріях та обмеженнях. Знання про безпечне та

ефективне судноплавство в морях і океанах в основному включають його методи. У навігаційну практику постійно впроваджуються дослідження та розробки нових методик. Стан безпеки морського судноплавства можна представити як функцію (структуру), яка залежить від багатьох технічних параметрів суден, стану навколишнього середовища, інфраструктури району плавання та рівня кваліфікації судноводіїв.

На підставі проведеного аналізу документів та досліджень щодо визначення факторів які впливають на безпеку судноплавства, можна зазначити про наявність різноманітної кількості груп які їх об’єднують та про відсутність структурованого підходу до цього питання. Таким чином вивчення факторів що впливають на безпеку роботи водного транспорту дозволило скласти групи, які були умовно розподілені за чотирма структурами (таблиця 1):

за впливом на безпеку людини;

за впливом на безпеку судна;

за впливом на безпеку вантажу;

за впливом на безпеку навколишнього середовища.

Також кожну групу факторів тій чи інший структури можна визначити за характером: технічним, організаційним, психофізіологічним, зовнішнім або віднести до чинника який має вплив на довкілля.

Таблиця 1 - Структурна таблиця факторів, що впливають на безпеку судноплавства

Структура факторів за впливом на безпеку людини		
1	2	3
Групи	Зміст факторів	Характер
Стан безпеки та надійності судна як транспортного засобу в нормальних і аварійних режимах	стан судна, стан технічних засобів судна, стан вантажів, функціональних систем і пристроїв; склад і стан суднових рятувальних засобів індивідуального та колективного користування.	Технічний
Стан екіпажу	укомплектованість екіпажів; дисциплінованість екіпажу; адаптація до нового колективу та умов праці; здатність, навички, знання (професійна підготовка та досвід); індивідуальні особливості особи (розумовий і емоційний стан); фізичний стан (придатність за станом здоров'я, вживання наркотиків і алкоголю, втома); обов'язки, пов'язані із діями до, під час і після аварійної події; психологічна установка; здатність екіпажу протистояти терористичним проявам.	Організаційний, психофізіологічний
Організація на судні	розподіл завдань і обов'язків; склад екіпажу (національність, компетентність); рівень укомплектованості екіпажем; робоче навантаження (складність завдань); час роботи та відпочинку; процедури та постійно діючі накази; зв'язок (зовнішній та внутрішній); управління і контроль на судні; організація підготовки і навчань на судні; взаємодія, включаючи управління ресурсами; планування (рейсів, вантажоперевезень, технічного обслуговування).	Організаційний, психофізіологічний

Продовження табл. 1

1	2	3
Умови праці і побуту на судні	рівень автоматизації; ергономічність конструкції робочих і жилих приміщень, приміщень для відпочинку, обладнання (устаткування); адекватність побутових умов; можливість відпочинку; адекватність харчування; рівень качки судна; вібрація, підвищена (понижена) температура і шум.	Організаційний, технічний
Зовнішні впливи	несприятливі метеоумови; політика суднової компанії (СК), підприємства, організації, установи в галузі найму на роботу; політика СК, підприємства, організації, установи і прийняті принципи щодо безпеки (культура, психологічні установки і довіра); прихильність адміністрації в справі забезпечення безпеки; загальна політика адміністрації; захист інтересів моряків профспілками; розклад заходів суден СК у порт; контракти та (або) колективні трудові домовленості й угоди; визначення обов'язків; правила, огляди і перевірки (міжнародні, національні, портові, з боку класифікаційних товариств та інші); зв'язок між судном і берегом та з іншими суднами, у тому числі з СК; економічний вплив: затрати коштів на отримання достатнього рівня безпеки; рівень організації та оснащеності пошуково-рятувальної служби в країні та взаємодія її з пошуково-рятувальними службами інших країн; якість медичного контролю; контроль в портах, організація розслідування аварій.	Зовнішній, організаційний
Структура факторів за впливом на безпеку судна		
Групи	Зміст факторів	Характер
Незадовільні властивості судна	плавучість, стійкість, непотоплюваність, хідкість, керованість, мореплавність, міцність, живучість	Технічний
Зовнішні впливи і умови	вітер, хвилювання, течія, погана видимість (туман, темний час доби), температура повітря, льодова обстановка, запас води під кілем; надводні перешкоди (айсберги, плавучі предмети), підводні перешкоди (рифи, скелі, мілини); інфраструктури району плавання; інтенсивність руху суден, обмеженість у районі плавання; умови переходу і заходу в порт (служби руху суден, лоцмани та інші).	Зовнішній
Стан (відмови) суднових технічних засобів та обладнання	конструкція; стан технічного обслуговування; обладнання (наявність, надійність); характеристики вантажу, включаючи кріплення, обробку і догляд; свідоцтва.	Технічний

Закінчення табл. 1

1	2	3
Помилки у діях людини	помилки у діях екіпажу, пасажирів, персоналу чи бездіяльність осіб, які забезпечують безпеку судна; порушення технологічних правил та інструкцій при перевезенні контейнерів, небезпечного й іншого вантажу; непрофесійне планування та управління судновими операціями.	Організаційний, психофізіологічний
Інформаційна безпека	безпека інформаційних процесів у системі керування та автоматизованих системах, що використовуються для вирішення завдань керування судновими процесами.	Технічний, організаційний
Структура факторів за впливом на безпеку вантажу		
Групи	Зміст факторів	Характер
Властивості вантажів	фізико-хімічні та інші властивості вантажів; небезпечність вантажів.	Технічний
Умови розміщення вантажу на судні	правильність розміщення, кріплення і сепарації вантажів на судні.	Організаційний, технічний
Зовнішні умови та впливи	качка, крен, заливання, зледеніння.	Зовнішній
Аварійні події	аварійні пошкодження судна та суднових технічних засобів, затоплення відсіків, пожежі та вибухи.	Технічний
Порушення правил та технології перевезення спеціалізованого вантажу	небезпечні вантажі, рефрижераторні вантажі та ін.	Організаційний, технічний
Структура факторів за впливом на безпеку навколишнього середовища		
Групи	Зміст факторів	Характер
Аварійні пошкодження судна або його технічних засобів	розливи палива та нафтопродуктів, радіоактивне зараження при аваріях суден з ядерними енергетичними установками тощо.	Технічний, вплив на довкілля
Недотримання правил зберігання та перевезення небезпечних вантажів або недосконалості цих правил	потрапляння небезпечних речовин у навколишнє середовище; значення концентрацій небезпечних речовин.	Організаційний, вплив на довкілля
Помилкові дії екіпажу при суднових операціях	заправка паливом, навантаження-вивантаження небезпечних вантажів, здійснення заходів щодо боротьби за живучість судна та ін.	Організаційний, вплив на довкілля
Пожежі та вибухи на судні	знаходження судна з пожежею поблизу інших пожежо- та вибухонебезпечних суден та берегових об'єктів.	Організаційний, вплив на довкілля
Використання типів суден, особливо швидкохідних, що створюють потужне хвилеутворення	пошкодження та руйнування берегів, берегових споруд та інших суден.	Організаційний, вплив на довкілля
Забруднення на інший вплив	скидання води з суден: баластні води, стічні води, трюмна вода; тверді відходи; забруднення атмосфери: вихлопні гази, вплив вуглекислого газу; звукове забруднення; зіткнення суден з морськими видами тварин.	Організаційний, вплив на довкілля

Провівши кількісний аналіз вказаних в таблиці груп за характером встановлено, що на першому місті йдуть групи факторів за організаційним характером - 13 згадок, далі йдуть групи за технічним характером - 10, за впливом на довкілля - 6, а психофізіологічні та зовнішні

чинники розділили четверте місце - по 3 згадки. Дані кількісні показники свідчать про найбільший вплив на безпеку судноплавства людського фактору (організаційні та психофізіологічні фактори в сукупності). Багата роль впливу у технічних чинників. Також великий вплив здійснює судно на навколишнє середовище.

Висновки. Наведені в даному дослідженні фактори можуть уточнюватись, доповнюватися в міру поглиблення досліджень. Чим докладніше враховується вплив факторів, тим точніше можна отримати кількісні показники безпеки. Безпеку судноплавства можна визначити кількома способами. У цій статті подано структуровані фактори, що впливають на безпеку судноплавства, які пропонується для подальшого дослідження визначати за характером: технічним, організаційним, психофізіологічним, зовнішнім або віднести до чинника який має вплив на довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Наказ Міністерства транспорту України від 20 листопада 2003 року № 904 про затвердження Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1193-03#Text (дата звернення 23.11.2023).

2. Безпека судноплавства як важлива умова охорони людського життя. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2016_3_4 (дата звернення 23.11.2023).

3. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за січень – червень 2023 року. URL: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/Zvit_1_2023.pdf (дата звернення 23.11.2023).

4. Роль людського фактору в підвищенні економічної безпеки судноплавства. URL: http://rinek.onu.edu.ua/article/view/201433/202331 (дата звернення 23.11.2023).

5. Поняття безпеки мореплавства. Методи забезпечення безпеки мореплавства. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/Конференция_2019_Том_1.pdf#page=133 (дата звернення 23.11.2023).

6. Міжнародне морське право. URL: http://yport.inf.ua/ponyatie-bezopasnosti-moreplavaniya-metodyi-55355.html (дата звернення 23.11.2023).

7. Шляхи підвищення безпеки судноплавства. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/13807/1/11_21_Греція-Science-foundations-of-modern-science-and-.pdf#page=604 (дата звернення 23.11.2023).

8. Використання імітаційного моделювання у процесі підготовки судноводіїв: вплив зовнішніх факторів на характеристики руху судна. URL: http://www.ite.kspu.edu/index.php/ite/article/view/811/791 (дата звернення 23.11.2023).

9. Фактори впливу на ефективність функціонування системи безпеки судноплавства. URL: https://sis-journal.com/wp-content/uploads/2020/07/Slovak-international-scientific-journal-№42-2020-VOL.1.pdf#page=31 (дата звернення 23.11.2023).

10. Overview of Definitions of Maritime Safety, Safety at Sea, Navigational Safety and Safety in General. URL: https://www.transnav.eu/files/Overview_of_Definitions_of_Maritime_Safety_Safety_at_Sea_Navigational_Safety_and_Safety_in_General,898.pdf (дата звернення 23.11.2023).

11. The international convention for the safety of life at sea: highlighting interrelations of measures towards effective risk mitigation. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25725084.2021.1880766 (дата звернення 23.11.2023).

12. IALA Guideline - G1124. The use of Ports and Waterways Safety Assessment (PAWSA) MK II TOOL. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, St Germain en Laye, France, June 2017.

13. IALA Training Seminar on Risk Management - PAWSA, IWRAP MK2 & Simulation. Final Report. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, St Germain en Laye, France, 15-19 November 2010.

14. Risk Management in Marine - and Subsea Operations. Recommended Practice No. DNV-RP-H101. Det Norske Veritas. January 2003.

15. Embracing digitalization for safe navigation. URL: https://safety4sea.com/cm-embracing-digitalization-for-safe-navigation/ (дата звернення 23.11.2023).

REFERENCES

1. Order of the Ministry of Transport of Ukraine dated November 20, 2003 No. 904 on the approval of the Regulation on the safety management system of maritime and river transport. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1193-03#Text (access date 11/23/2023).

2. Navigation safety as an important condition for protecting human life. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2016_3_4 (access date 11/23/2023).

3. The state of navigation safety and accidents on water transport in Ukraine (including outside its borders, but with Ukrainian vessels), including small (small) vessels, for January - June 2023. URL: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/Zvit_1_2023.pdf (access date 11/23/2023).

4. The role of the human factor in increasing the economic safety of shipping. URL: http://rinek.onu.edu.ua/article/view/201433/202331 (access date 11/23/2023).

5. The concept of maritime safety. Methods of ensuring maritime safety. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/Конференция_2019_Том_1.pdf#page=133 (access date 11/23/2023).

6. International maritime law. URL: http://yport.inf.ua/ponyatie-bezopasnosti-moreplavaniya-metodyi-55355.html (access date 11/23/2023).

7. Ways to improve shipping safety. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/13807/1/11_21_Gretsia-Science-foundations-of-modern-science-and-.pdf#page=604 (access date 11/23/2023).

8. The use of simulation modeling in the process of training ship drivers: the influence of external factors on the characteristics of the ship's movement. URL: http://www.ite.kspu.edu/index.php/ite/article/view/811/791 (access date 11/23/2023).

9. Factors affecting the effectiveness of the functioning of the shipping safety system. URL: https://sis-journal.com/wp-content/uploads/2020/07/Slovak-international-scientific-journal-№42-2020-VOL.1.pdf#page=31 (access date 11/23/2023).

10. Overview of Definitions of Maritime Safety, Safety at Sea, Navigational Safety and Safety in General. URL: https://www.transnav.eu/files/Overview_of_Definitions_of_Maritime_Safety_Safety_at_Sea_Navigational_Safety_and_Safety_in_General,898.pdf (access date 11/23/2023).

11. The international convention for the safety of life at sea: highlighting interrelations of measures towards effective risk mitigation. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25725084.2021.1880766 (access date 11/23/2023).

12. IALA Guideline - G1124. The use of Ports and Waterways Safety Assessment (PAWSA) MK II TOOL. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, St Germain en Laye, France, June 2017.

13. IALA Training Seminar on Risk Management - PAWSA, IWRAP MK2 & Simulation. Final Report. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, St Germain en Laye, France, 15-19 November 2010.

14. Risk Management in Marine - and Subsea Operations. Recommended Practice No. DNV-RP-H101. Det Norske Veritas. January 2003.

15. Embracing digitalization for safe navigation. URL: https://safety4sea.com/cm-embracing-digitalization-for-safe-navigation/ (access date 11/23/2023).

Startsev O.N., Kramarenko V, V., Chervony O.D.

STRUCTURES AND CONTENT OF FACTORS AFFECTING THE LEVEL OF SHIPPING SAFETY IN SEA AND INLAND WATER TRANSPORT

In this work, an analysis of modern research devoted to the study of the components of shipping safety, namely factors affecting its level, was carried out, a number of structures were developed and the task of ensuring its safe functioning was formulated. The definition of shipping safety is given as a set of measures that includes science, knowledge and practice, which allow ships to pass through water areas between destination ports, providing them with an appropriate level of safety under the accepted criteria and restrictions. The direction of further research of the impact of these factors on maritime safety is proposed.

In the course of the research, the authors of the article came to the conclusion that the factors that affect the level of navigation safety at sea and inland water transport can and should be further specified and supplemented as the research deepens. The more detailed the influence of factors is taken into account, the more accurately quantitative safety indicators can be obtained. Shipping safety can be defined in several ways. This article presents structured factors affecting shipping safety, which are proposed for further research to be determined by nature: technical, organizational, psychophysiological, external, or attributed to a factor that has an impact on the environment.

In the past, many shipping safety issues were addressed by legislation. And, definitely and indisputably, this is a good way. But the review of issues related to safety at sea must include continued research in the following areas: seafarer fatigue, stress, health, situational awareness, teamwork, decision-making, communication, information sharing, technological development, digitalization, automation , environmental impact and, above all, safety culture.

Keywords: ensuring the safety of navigation, safe operation of ships, sea and inland water transport, safety of navigation, factors of safety of navigation.

УДК 656.6.08 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.24

Чимшир В.І., Даниленко О.Б., Шульга Ю.М.

БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА НА МОРСЬКОМУ ТА ВНУТРІШНЬОМУ ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ ЯК ОБ'ЄКТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасних умовах світового економічного ринку надзвичайно важливою стає роль морського і внутрішнього водного транспорту, оскільки понад 80% міжнародної торгівлі відбувається морським шляхом. Зростання кількості суден і їх характеристик вимагає посилення заходів щодо підвищення безпеки судноплавства. Проблема стає особливо актуальною через цифрову трансформацію та революцію в інформаційних технологіях, а також в умовах непередбачуваних природних умов та інтенсивного трафіку.

У контексті важливості безпеки судноплавства, важливим є розвиток технологій, які впливають на обсяги судноплавства, а також на регулювання і норми управління. Зокрема, проблеми технічного та людського фактору, а також діджиталізація в сфері судноплавства, на які впливає тотальна цифрова трансформація, визначають актуальність питання.

Зазначається, що несумісність нормативно-правових актів і дефіцит відповідних міжнародних стандартів управління судноплавством можуть призвести до небезпеки.

Зокрема, людський фактор визнається головним чинником аварій на судах, і Міжнародна Морська Організація акцентує увагу на безпеці екіпажів.

Україна, яка стикається з блокадою морських портів через військову агресію, виявляє необхідність підвищення безпеки не лише в акваторії морських портів, але й на річці Дніпро. Ситуація створює необхідність аналізувати та зменшувати вплив факторів, які суттєво впливають на рівень безпеки судноплавства.

Мета статті полягає в узагальненні результатів наукових досліджень для визначення шляхів підвищення безпеки судноплавства. Зазначається, що дослідження в напрямках зменшення впливу технічних, організаційно-правових і психофізіологічних факторів вважаються найбільш перспективними для подальшого вдосконалення безпеки судноплавства.

Ключові слова: *безпека судноплавства, морський та річковий транспорт, міжнародна торгівля, міжнародні стандарти, технічний фактор, людський фактор, нормативно-правові акти, інформаційні технології, цифрова трансформація, аварійність на суднах, регулювання судноплавства.*

Постановка проблеми. Значна роль морського і внутрішнього водного транспорту в структурі світового економічного ринку є незаперечною. Водночас продовжується зростання кількість суден, їх водотоннажності і швидкості. Тому все більш актуальною стає задача підвищення рівня безпеки судноплавства. Необхідність вдосконалення шляхів та методів підвищення безпеки судноплавства зумовлена низкою чинників:

По-перше, в сучасних умовах спостерігається тотальна діджиталізація усіх сфер професійної діяльності, зокрема і судноплавства. При цьому, серед характерних ознак, які притаманні світовому ринку морських перевезень на сучасному етапі доцільно виділити «революцію» в інформаційних технологіях і технологіях зв'язку, що значно знизили витрати на зв'язок при транспортуванні вантажів [1, с. 5]. За даними Національного інституту стратегічних досліджень у перспективі розвиток світового судноплавства експерти пов'язують з впливом шести найбільш узагальнених груп факторів, одним з яких є «розвиток технологій, які на тлі уповільнення темпів зростання світового виробництва і торгівлі відіграватимуть провідну роль у зростанні обсягів судноплавства» [1, с. 10].

По-друге, незважаючи на впровадження в практику судноплавства найпередовіших досягнень науки і техніки, використання при будівництві та обладнанні суден новітніх технологій, судна працюють у ворожому природному середовищу (шторми, льоди, тумани, течії), в умовах інтенсивного трафіку, тощо. На суднах встановлено багато складних конструктивних елементів, пристроїв і приладів, які можуть відмовити з різних причин. Норми і правила, що регламентують управління суднами і їх експлуатацію, недосконалі і мають недоліки[3].

По-третє, нормативно-правові документи Міжнародної морської організації (ММО) забезпечують міжнародні стандарти з управління безпечною експлуатацією суден, запобіганням забруднення та наголошують на необхідності відповідної організації управління, яка дозволяє відповідати потребам осіб, що перебувають на суднах, у досягненні та підтриманні високих стандартів безпеки та захисту навколишнього середовища та на дотримання цих стандартів всіма членами ММО.

По-четверте, на важливість підтриманні високих стандартів безпеки судноплавства та захисту навколишнього середовища наголошується і у вітчизняних нормативно-правових документах таких як Закон України "Про транспорт", Кодекс торговельного мореплавства України, Водний кодекс України, Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті затвердженого Наказом Міністерства транспорту України 20.11.2003 № 904 із змінами.

Посилює актуальність питання безпеки судноплавства й те, що через військову агресію російської федерації проти України починаючи з 24 лютого 2022 року, фактично розпочалась блокада морських портів на південному узбережжі України. Військові кораблі країни-агресора блокують судноплавство в Чорному та Азовському морях для суден, що прямують до/з

морських портів України наражаючи їх на небезпеку. Наказом Міністерства інфраструктури України від 28 квітня 2022 року № 256 «Про закриття морських портів», зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 29 квітня 2022 року за № 470/37806, закрито морські порти Бердянськ, Маріуполь, Скадовськ, Херсон з дня набрання чинності наказом до відновлення контролю над зазначеними морськими портами. Унаслідок блокування терористичними військами російської федерації частини Дніпра в Херсонській та Запорізькій областях зупинені перевезення Дніпром, захоплений Каховський судноплавний шлюз (пошкоджене обладнання шлюзу). Таким чином, небезпечним стало судноплавство не тільки в акваторії морських портів на південному узбережжі України, але і на річці Дніпро. Повноцінно працювали та продовжують працювати та збільшувати вантажопереробку тільки три морські порти у гирлі Дунаю – Ізмаїльський, Ренійський та Усть-Дунайський. Це зростання вплинуло на стан аварійності на морському та внутрішньому водному транспорті України в цьому регіоні [8].

Тобто, в сучасних умовах з’являються фактори, що суттєво впливають на рівень безпеки судноплавства, які потребують аналізу ступеню цього впливу та пошуку шляхів його зниження.

Мета статті провести аналіз та узагальнити результати сучасних наукових досліджень, у яких розглядаються різноманітні аспекти підвищення рівня безпеки судноплавства для визначення шляхів вдосконалення змісту, форм і методів цього процесу.

Огляд останніх досліджень та літератури. Важливі аспекти безпеки судноплавства неодноразово привертали увагу науковців, Так, зокрема В.Сергійчик у дисертаційному дослідженні зупинилася на технічній складовій безпеки мореплавства, Т. Аверочкіна розглядала роль «людського чинника» у забезпеченні безпеки судноплавства, а Д. Іванов досліджував інформаційно-правові основи забезпечення безпеки мореплавства, І. Бурмака досліджував методи зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення, І.Фусара обґрунтовував шляхи підвищення точності судноводіння, О. Янчецький розглядав проблему вдосконалення методів попередження зіткнення суден врахуванням ефективності їх маневру розходження, К. Ткаченко здійснив дослідження проблем системи підготовки фахівців водного та морського транспорту, С. Волошинов обґрунтовує особливості застосування системного підходу до алгоритмічної підготовки судноводіїв в умовах інформаційно-комунікаційного середовища, М. Мусоріна досліджує формування технічної компетентності майбутніх фахівців судноводіння у процесі навчання технічних дисциплін, особливості використання інформаційно-комунікаційних технології у підготовці майбутніх судноводіїв знайшли своє відображення у публікаціях О. Безбаха, С.Волошинова, В. Смелікової та М. Шермана, О.Даниленко в своїх роботах досліджував проблему неперервної професійної підготовка судноводіїв.

Таким чином, у вітчизняній науці бракує комплексного дослідження впливу групи факторів технічного, організаційного, психофізіологічного характеру на рівень безпеки судноплавства з урахуванням новітніх змін у морський сфері, а також щодо обґрунтування шляхів удосконалення методів зниження цього впливу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Узагальнення доступного для огляду масиву наукових публікацій дозволило поділити їх на групи. Ці групи ми формували з врахуванням того, що система управління безпекою судноплавства охоплює:

захист людини - захист її життя, здоров'я, майна, її прав щодо використання територіального моря, внутрішніх вод та інших водойм загального користування для праці, відпочинку, спорту, використання водних ресурсів, у тому числі і для судноплавства;

захист довкілля - його захист від негативного впливу судноплавства;

судна - їх стан, умови плавання та перебування на них людини;

водні шляхи - їх придатність до використання, умови плавання ними;

берегові об'єкти - їх відповідність стандартам безпеки судноплавства, готовність і надійність[4].

Також [4] вимагає, що управління безпекою судноплавства на морському та внутрішньому водному транспорті має забезпечувати виявлення та оцінку факторів (технічні, організаційні,

психофізіологічні), що впливають на рівень безпеки, включаючи фактори ризику, підготовку, прийняття та реалізацію управлінських рішень, спрямованих на забезпечення належного рівня безпеки судноплавства.

До першої групи ми включили наукові роботи де вчені досліджували проблеми, що пов'язані з окремими особами, зокрема здатність, навички, знання (підсумки підготовки та досвід); індивідуальні особливості особи (розумовий і емоційний стан); фізичний стан; психологічна установка тощо. До цієї групи можна зарахувати дослідження та публікації, у яких науковці розглядають проблему професійної підготовки судноводіїв з позицій компетентнісного підходу. Це дисертації М. Мусоріної (формування технічної компетентності майбутніх фахівців судноводіння у процесі навчання технічних дисциплін) [9], О. Фролової (формування соціокультурної компетенції майбутніх судноводіїв у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін) [10] та І. Сокола (педагогічні умови формування професійної компетентності судноводіїв у процесі вивчення фахових дисциплін) [11]. У публікаціях С. Єгорової представлено особливості впровадження засад компетентнісного підходу у вищу професійну освіту фахівців морського транспорту. Дослідження В. Кліндухової та О. Ляшко присвячено формуванню професійної математичної компетентності майбутніх фахівців морської галузі. Формуванню соціокультурної компетенції майбутніх судноводіїв у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін присвячено дослідження О. Фролової [12]. Представляють також інтерес публікації О. Попової про особливості професійної діяльності майбутніх судноводіїв і сутність їх професійної компетентності, Н. Слюсаренко, у якому автор пропонує шляхи формування соціокультурної особистості майбутнього судноводія на засадах компетентнісного підходу, а також дослідження О. Тимофєєвої, присвяченому формуванню соціально-комунікативної компетентності майбутніх судноводіїв у процесі вивчення гуманітарних дисциплін. Також до цієї групи можна включити публікації де підіймаються проблеми психологічної стійкості фахівців морської галузі. Так О.Сорока досліджувала причини та особливості девіантної поведінки фахівця морського транспорту в екстремальних ситуаціях [13], стресогенність професійної діяльності фахівців в умовах тривалого морського рейсу[14].

В контексті управління безпекою судноплавства велика кількість дослідників приділяло увагу організаційно-правовій стороні проблеми. Забезпечення безпеки мореплавства достатньо часто стає предметом досліджень в українській та зарубіжній правознавчій сфері, її розглядові присвячували свої наукові пошуки Т. В. Аверочкіна, Г. А. Анцелевич, О. М. Балобанов, О. О. Балобанов, О. Ф. Висоцький, В. М. Гуцуляк, В. В. Деміденко, Д. А. Іванов, А. Л. Колодкін, С. О. Кузнецов, В. О. Сергійчик, Н.О. Федчун, О. М. Шемякін, Т.Плачкової та інші працівники. Дослідження цих науковців ми включили у другу групу. Зокрема а в цих наукових працях підіймалися питання впливу на безпеку судноплавства політики судноплавних компаній, підприємств, організацій, установ в галузі найму на роботу, прийнятих принципів щодо безпеки (культура, психологічні установки і довіра), прихильність адміністрації в справі забезпечення безпеки; розклад заходів суден у порти, контракти та (або) колективні трудові домовленості й угоди, визначення обов'язків, зв'язок між судном і берегом.

Так Т.Плачковою, в роботі «Адміністративно-правовий механізм забезпечення безпеки мореплавства в Україні: генеза правового регулювання» в хронологічному порядку розглянуті основні нормативно-правові акти українського законодавства в сфері забезпечення безпеки мореплавства. Відзначається актуальність комплексного дослідження сучасного адміністративно правового механізму забезпечення безпеки мореплавства в Україні з урахуванням останніх змін в побудові системи органів управління морської сферою, а також в світлі оновлення нормативно-правового забезпечення морської діяльності. Автор приходить до висновку про те, що зміни в правовому регулюванні механізму адміністративно-правового забезпечення безпеки мореплавства відбувалися дуже динамічне, зі спробою побудувати єдину, цілісну систему управління цим важливим аспектом мореплавства[16].

Цим саме автором у статті «Інституціоналізація системи органів управління безпекою мореплавства в Україні» досліджено формування системи органів управління безпекою

мореплавства в Україні з урахуванням новітніх змін. Запропоновано відновлення ефективного національного організаційно-правового механізму забезпечення безпеки мореплавства завдяки формуванню оновленої системи державного управління морською діяльністю та забезпеченням безпеки мореплавства. Автор пропонує окремі зміни у організаційній побудові органів управління безпекою мореплавства Україні з необхідністю закріплення провідної ролі національного класифікаційного товариства в їх структурі[17].

Аналіз міжнародного нормативного регулювання безпеки судноплавства під час здійснення перевезень морським транспортом була присвячена стаття О.Шелухіна «Нормативне забезпечення безпеки судноплавства під час здійснення перевезень морським транспортом». Науковцем проаналізовано роль та місце міжнародних Конвенцій, виданих структурами ООН, ратифікованих Україною, доступні статистичні відомості щодо стану аварійності у морському судноплавстві по суднах, що здійснюють морські перевезення під прапором України та країн-членів Європейського Союзу, висвітлено предмет правового регулювання та стислий зміст у галузі забезпечення безпеки судноплавства таких міжнародних конвенцій, як Конвенція ООН з морського права, Міжнародна конвенція з пошуку та рятування на морі, Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі, Міжнародний кодекс з охорони суден та портових засобів, Конвенція про міжнародні правила попередження зіткнень суден у морі, Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та запобігання забрудненню. За результатами проведеного дослідження, з огляду на статистику аварійних подій на морському транспорті, зроблено висновок про необхідність поглибленої підготовки спеціалістів галузі водного транспорту за напрямами вивчення вимог до забезпечення безпеки судноплавства[18].

У дисертаційному дослідженні В.О. Сергійчика «Адміністративно-правові засади виконання Україною обов’язків держави прапора щодо контролю технічного стану морських суден» [19] аналізується чинне законодавство України, яке містить положення стосовно складу та повноважень органів виконавчої влади, що здійснюють функції технічного регулювання. Досліджено історичні, правові та організаційні підвалини створення й становлення національного класифікаційного товариства «Регістр судноплавства України», його правовий статус, функції і повноваження. Запропоновано зміни у складі центральних органів виконавчої влади України щодо технічного регулювання у галузі торговельного мореплавства та визначено їхню функціональну компетенцію. Стверджується про необхідність забезпечення ефективності виконання Україною обов’язків держави прапора щодо контролю технічного стану морських торговельних суден шляхом удосконалення адміністративно-правових засад виконавчо-розпорядчої діяльності відповідних органів виконавчої влади.

Третя група наукових досліджень об’єднує публікації де розглядаються фактори, пов'язані із судном як інтегрованою системою – системою, що управляє судновими процесами (судноводінням, відтворенням енергії, забезпеченням життєдіяльності, збереження вантажу, тощо). Інтегрована система судном є багатоконтурною системою та складається з різного виду та рівня пристроїв управління та систем, що здійснюють збір та оброблення інформації про стан різноманітних суднових об’єктів управління та зовнішнього середовища, опрацювання рішень про вплив на об’єкти та їх виконання, зокрема адміністративну систему; інтегровану систему ходового містка; систему управління електропостачанням, системи дистанційного управління головною енергетичною установкою та кермом судна, систему управління вантажними операціями [15]. В цю групу, зокрема можна включити роботи де розглядаються вплив на рівень безпеки судноплавства конструкції судна, стану технічного обслуговування, обладнання (наявність, надійність), рівень автоматизації виробничих процесів й інтеграції обладнання, особливості перевезення вантажів різних видів, включаючи кріплення, обробку і догляд.

Відносно конструкції судна, хотілось би виділити публікації групи авторів [20], де розглядається взаємозв'язок між класними і статутними правилами, а також загальний підхід до морських технологій та інновацій для безпеки суден з особливим акцентом на остійність шляхом використання результатів досліджень та статтю [21], де розглядаються різні проектні

та експлуатаційні проблеми, пов'язані з живучістю надводних військово-морських і торговельних кораблів, з використанням альтернативної імовірнісної методології. Здебільшого сучасні наукові дослідження щодо впливу конструкції судна на безпеку судноплавства пов’язані з спеціалізованими вузькопрофільними суднами або спорудами. Так у статті [22] представлено практичнє дослідження конструктивного дизайну танкера з аварійно стійкою бічною конструкцією, яка здатна знизити ризик зіткнення та з підвищеною безпекою для навколишнього середовища, з урахуванням необхідних інвестиційних витрат, а також аспектів розподілу ризиків між зацікавленими сторонами морського судочинства. Також у досліджені японських науковців було розглянута ефективність прототипу буферної носової частини у зіткненнях суден у порівнянні зі стандартними носовими частинами, на прикладі двох двокорпусних суден типу VLCC [23]. Також на прикладі танкера VLCC крупою авторів [24] було проведено спрощений метод оцінки втрати структурної цілісності корпусу судна, як при зіткненні з іншим судном, так і за умов старіння. Привертає уваги дисертація Цесилії Остерман (Cecilia Österman «Developing a Value Proposition of Maritime Ergonomics»), де розглянуто вплив конструкції судна, тобто її ергономічність, на роботу екіпажу судна та кількість людських жертв на морі та нещасних випадків [25].

В контексті стану технічного обслуговування групою авторів [26] було проведено дослідження прогнозованого технічного обслуговування в судноплавній галузі на основі обчислювальної моделі штучного інтелекту з використанням даних моніторингу в реальному часі. У статті групи дослідників [27]. було запропоновано впровадження технічного індексів ефективності(VTI-Vessel Technical Index) за для можливості моніторингу продуктивності судна без необхідності вимірювання швидкості на воді, які вважаються ненадійними для більшості суден. Методологію технічного обслуговування на основі управління ризиками (УОР) для розробки плану технічного обслуговування риболовецьких суден було досліджено у статті групи дослідників [28].

Одну з головних ролей у безпеці судноплавства відіграє надійність суднового обладнання, а з розвитком ІТ технологій кібербезпека є основою цієї надійності. Шумілова К.В. у своїй статті розглянула реалізацію стратегій кібербезпеки в системі управління безпекою судна [29]. У своїй дисертації «Підвищення ефективності експлуатації аварійно-попереджувальної системи судна» Кондрашов К.В. також розглядав надійність суднового обладнання на прикладі системи діагностування суднових механізмів в режимі реального часу (аварійно-попереджувальна сигналізація судна), основним завданням якої є контроль стабільної роботи всіх суднових систем та попередження оператора в разі появи будь-якої несправності [30]

Актуальною залишається проблема автоматизації технологічних процесів у судноводінні. Так у своїй дисертації Кеті Ейлвард «Автоматизовані функції: Їх потенціал впливу на морські соціотехнічні системи» розглянула проект валідації системи управління морським рухом (Sea Traffic Management - STM) як контекст для вивчення функцій низькорівневої автоматизації, призначених для підвищення безпеки та ефективності навігації операторів (як судноводіїв, так і операторів служби руху суден) [31]. А у своїй статті [32] група авторів представила алгоритм на основі нелінійної моделі предиктивного управління (NMPC - Nonlinear Model Predictive Control) для безпечної навігації мультиагентних динамічних систем у змінному середовищі з нерухомими або рухомими перешкодами, тобто повністю автоматизованих рух суден без екіпажів у гавані Тронхеймського фйорду.

Багато наукових дослідників обирало тему досліджень по характеристикам вантажу, включаючи кріплення, пакування, догляд і обробку. Так Чженді Му (Zhendi Mu) у своїй докторській дисертації досліджує безпечне укладання та кріплення наливних вантажів для морських контейнерних перевезень.[33]. Також у дисертації Цзен Сіфанг (Zeng Sifang) проаналізував ризик у логістичному ланцюгу морських перевезень небезпечних вантажів та з'ясувати фактори ризику на кожній ланці за допомогою кількісного аналізу, що не тільки може запобігти повторному виникненню аварії з небезпечними вантажами, але й може забезпечити довідкову базу для морської адміністрації та відповідних судноплавних підприємств, коли вони встановлюють запобіжні заходи для морських перевезень небезпечних вантажів [34]. Тривале

транспортування спеціалізованими морськими судами технічних рідин з високою густиною було розглянуто у своїй статті Карьянским С. А [35], Стратифікація густини технічних рідин з високою густиною при їх тривалому транспортуванні спеціалізованими морськими судами було досліджено у статті Марьянова Д. Н [36]

Окрему групу наукових досліджень складають роботи пов'язані із проблемами впливу довкілля та зовнішніх факторів таких як гідрометеорологічні умови плавання, стан забезпечення безпечного заходу в порт, інтенсивність руху суден в даному районі плавання, льодова обстановка, міжнародні, національні та портові правила огляду і перевірки суден, з боку класифікаційних товариств та інші, тощо. Враховуючи дуже широкий спектр напрямків дослідження цієї групи, автори планують розглянути зазначену проблему в окремій науковій публікації.

Висновки. Отже, вдосконалення шляхів та методів підвищення рівня безпеки судноплавства є актуальною науковою проблемою. Ця проблема неодноразово перебувала у полі зору науковців. Моніторинг досліджень, монографій, наукових статей і наукових звітів дозволив виокремити ті з них, які певною мірою дотичні до теми дослідження. Спираючись на проведене узагальнення доступного для огляду масиву наукових публікацій найбільш актуальними для подальшого наукового пошуку шляхів і методів підвищення безпеки судноплавства, на наш погляд є дослідження в напрямках які зменшували би вплив факторів технічного, організаційно-правового, психофізіологічного характеру, та зовнішніх факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пріоритети державної морської політики у сфері функціонування та розвитку морегосподарського комплексу України. Київ: НІСД, 2016. 46 с.

2.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80#Text

3.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text

4.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text

5. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1193-03#Text

6. Даниленко О.Б. Неперервна професійна підготовка майбутніх судноводіїв як предмет наукових досліджень/ Науковий вісник Льотної академії. Серія: Педагогічні науки. Збірник наукових праць / Гол. ред. Т.С. Плачинда. Кропивницький: ЛА НАУ, 2019. Вип. 5. с.90-96

7. Бичковський Ю.В., Шахов А.В. Оцінка впливу людського елементу на безпеку морського судноплавства. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті, № 2 (71), 2020.с.102

8.URL:https://marad.gov.ua/ua/diyalnist/stan-avarijnosti-ta-bezpeki-sudnoplavstva-na-vodnomu-transporti

9. Мусоріна М. О. Формування технічної компетентності майбутніх фахівців судноводіння у процесі навчання технічних дисциплін: автореф. дис. ... канд. пед.. наук \: 13.00.02. Київ, 2018. 21 с.

10. Фролова О. О. Формування соціокультурної компетенції майбутніх судноводіїв у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін: автореф. дис. канд. пед. наук \: 13.00.04. Тернопіль: Тернопільський нац. пед. ун-т ім. В. Гнатюка, 2015. 20 с.

11. Сокол І. В. Формування професійної компетентності майбутніх судноводіїв у процесі вивчення фахових дисциплін: дис. … канд. пед. наук: 13.00.04. Херсон, 2011. 278 с.

12. Фролова О. О. Формування соціокультурної компетенції майбутніх судноводіїв у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04. Херсон., 2015. 179 с.

13. Сорока О. М. Причини та особливості девіантної поведінки фахівця морського транспорту в екстремальних ситуаціях / О. М. Сорока // Науковий журнал «Габітус». – Видавничий дім «Гельветика» 2020. – Том 2 – Вип. 12. – С. 208 – 212.

14. Сорока О.М. Стресогенність професійної діяльності фахівців в умовах тривалого морського рейсу: психологічний дискурс. / О.М. Сорока // KHELM. №7(35), 2020. – С. 111-118.

15.Л.Л.Вагущенко «Интегрированные системы ходового мостика», Одесса, 2003

16. Плачкова Т. М. Адміністративно-правовий механізм забезпечення безпеки мореплавства в Україні: генеза правового регулювання/ Вісник Чернівецького факультету Національного університету «Одеська юридична академія»: Випуск № 4/2016.- С.78-96

17. Плачкова Т. М. Інституціоналізація системи органів управління безпекою мореплавства в Україні/ https://lexportus.net.ua/arkhiv-2/120-lex-portus-1-9-2018

18. Шелухін О.М. Нормативне забезпечення безпеки судноплавства під час здійснення перевезень морським транспортом / Юридичний науковий електронний журнал: № 4/2021, С.664-665

19. Сергійчик В. О. Адміністративно-правові засади виконання Україною обов'язків держави прапора щодо контролю технічного стану морських суден : автореферат... канд. юрид. наук, спец.: 12.00.07. – Одеса, 2010. 20 с.

20. Fai Cheng, Spyros Hirdaris. Improvement of Ship Safety through Stability Research and Innovations / The 11th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 23-28 September 2012, Athens, Greece

21. Mirosław Gerik. Design and operational problems of safety of surface naval and merchant ships in damaged conditions / Gdansk University of Technology. *Annual Of Navigation* , 2007 Vol.12

22. Klanac, Alan & Varsta, Petri. (2011). Design of marine structures with improved safety for environment. *Reliability Engineering & System Safety*. 96. 75-90. 10.1016/j.ress.2010.06.016.

23. Yamada, Yasuhira & Endo, Hisayoshi & Pedersen, Preben. (2008). Effect of Buffer Bow Structure In Ship-Ship Collision. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2018. p.133-141

24. Wołoszyk, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2023). A simplified method to assess the impact of ship-to-ship collision on the risk of tanker ship hull girder breaking accounting for the effect of ageing. c.413-419. URL: https://doi.org/10.1201/9781003462170-50 (дата звернення 16.12.2023)

25. Cecilia Österman. Developing a value proposition of maritime ergonomics: Doctoral dissertation/ Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden, 2012. 78 p.

26. Veronica Jaramillo Jimenez, Noureddine Bouhmala, Anne Haugen Gausdal. Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, Volume 5, Issue 4,2020, Pages 358-386, ISSN 2468-0133, URL: https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003 (дата звернення 16.12.2023)

27. Bixngjie Guo, Prateek Gupta, Sverre Steen, Hans Anton Tvete. Evaluating vessel technical performance index using physics-based and data-driven approach. *Ocean Engineering*, Volume 286, Part 2, 2023, ISSN 0029-8018, URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115402. (дата звернення 16.12.2023)

28. Vindex Domeh, Francis Obeng, Faisal Khan, Neil Bose, Elizabeth Sanli. A novel methodology to develop risk-based maintenance strategies for fishing vessels. *Ocean Engineering,* Volume 253, 2022, 111281, ISSN 0029-8018, URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111281.(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822006758) (дата звернення 16.12.2023)

29. Шумілова К.В. Реалізація стратегії кібербезпеки в системі управління безпекою судна: дис. канд.тех.наук. Національний університет «Одеська морська академія», Україна, 2020.

30. Кондрашов К.В. Підвищення ефективності експлуатації аварійно-попереджувальної системи судна: дис. доктор філософії: 681.518.5. Херсон, 2021. 165 с.

31. Katie Aylward. Automated Functions: Their Potential for Impact Upon Maritime Sociotechnical Systems. Report no 2020:01. Department of Mechanics and Maritime Sciences. Chalmers University of Technology, SE-412 96. Gothenburg, Sweden, 2020. 64 p.

32. N.Q.H. Tran, I. Prodan, E.I. Grøtli, L. Lefèvre. Potential-field constructions in an MPC framework: application for safe navigation in a variable coastal environment. IFAC-*PapersOnLine*,

Volume 51, Issue 20, 2018, Pages 307-312, ISSN 2405-8963, URL: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.049 (дата звернення 16.12.2023)

33. Zhendi Mu. Safety analysis of OOG cargo stowage and securing on flat rack: Doctoral dissertation / World Maritime University. Dalian, China, 2021. 94 p.

34. Sifang Zeng. Risk assessment on carriage of maritime dangerous goods in packaged form by ship: Doctoral dissertation / World Maritime University. Dalian, China, 2016. 56 p.

35. Карьянский С. А. Обеспечение эксплуатационных характеристик высокоплотных технических жидкостей при их транспортировке морскими судами / С. А. Карьянский, Д. Н. Марьянов // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 97-105. URL: https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105. (дата звернення 17.12.2023)

36. Марьянов Д. Н. Повышение эффективности функционирования специальных систем специализированных морских судов // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. – 2020. – № 4(73). URL: http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9291 (дата звернення 16.12.2023)

REFERENCES

1. Priorytety derzhavnoi morskoi polityky u sferi funktsionuvannia ta rozvytku morehospodarskoho kompleksu Ukrainy. Kyiv: NISD, 2016. 46 s.

2.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80#Text

3.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text

4.URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text

5. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1193-03#Text

6. Danylenko O.B. Neperervna profesiina pidhotovka maibutnikh sudnovodiiv yak predmet naukovykh doslidzhen/ Naukovyi visnyk Lotnoi akademii. Seriia: Pedahohichni nauky. Zbirnyk naukovykh prats / Hol. red. T.S. Plachynda. Kropyvnytskyi: LA NAU, 2019. Vyp. 5. s.90-96

7. Bychkovskyi Yu.V., Shakhov A.V. Otsinka vplyvu liudskoho elementu na bezpeku morskoho sudnoplavstva. Rozvytok metodiv upravlinnia ta hospodariuvannia na transporti, № 2 (71), 2020.s.102

8.URL:https://marad.gov.ua/ua/diyalnist/stan-avarijnosti-ta-bezpeki-sudnoplavstva-na-vodnomu-transporti

9. Musorina M. O. Formuvannia tekhnichnoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv sudnovodinnia u protsesi navchannia tekhnichnykh dystsyplin: avtoref. dys. ... kand. ped.. nauk \: 13.00.02. Kyiv, 2018. 21 s.

10. Frolova O. O. Formuvannia sotsiokulturnoi kompetentsii maibutnikh sudnovodiiv u protsesi vyvchennia profesiino oriientovanykh dystsyplin: avtoref. dys. kand. ped. nauk \: 13.00.04. Ternopil: Ternopilskyi nats. ped. un-t im. V. Hnatiuka, 2015. 20 s.

11. Sokol I. V. Formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh sudnovodiiv u protsesi vyvchennia fakhovykh dystsyplin: dys. … kand. ped. nauk: 13.00.04. Kherson, 2011. 278 s.

12. Frolova O. O. Formuvannia sotsiokulturnoi kompetentsii maibutnikh sudnovodiiv u protsesi vyvchennia profesiino oriientovanykh dystsyplin: dys. ... kand. ped. nauk: 13.00.04. Kherson., 2015. 179 s.

13. Soroka O. M. Prychyny ta osoblyvosti deviantnoi povedinky fakhivtsia morskoho transportu v ekstremalnykh sytuatsiiakh / O. M. Soroka // Naukovyi zhurnal «Habitus». – Vydavnychyi dim «Helvetyka» 2020. – Tom 2 – Vyp. 12. – S. 208 – 212.

14. Soroka O.M. Stresohennist profesiinoi diialnosti fakhivtsiv v umovakh tryvaloho morskoho reisu: psykholohichnyi dyskurs. / O.M. Soroka // KHELM. №7(35), 2020. – S. 111-118.

15.L.L.Vahushchenko «Yntehryrovannыe systemы khodovoho mostyka», Odessa, 2003

16. Plachkova T. M. Administratyvno-pravovyi mekhanizm zabezpechennia bezpeky moreplavstva v Ukraini: heneza pravovoho rehuliuvannia/ Visnyk Chernivetskoho fakultetu Natsionalnoho universytetu «Odeska yurydychna akademiia»: Vypusk № 4/2016.- S.78-96

17. Plachkova T. M. Instytutsionalizatsiia systemy orhaniv upravlinnia bezpekoiu moreplavstva v Ukraini/ https://lexportus.net.ua/arkhiv-2/120-lex-portus-1-9-2018

18. Shelukhin O.M. Normatyvne zabezpechennia bezpeky sudnoplavstva pid chas zdiisnennia perevezen morskym transportom / Yurydychnyi naukovyi elektronnyi zhurnal: № 4/2021, S.664-665

19. Serhiichyk V. O. Administratyvno-pravovi zasady vykonannia Ukrainoiu oboviazkiv derzhavy prapora shchodo kontroliu tekhnichnoho stanu morskykh suden : avtoreferat... kand. yuryd. nauk, spets.: 12.00.07. – Odesa, 2010. 20 s.

20. Fai Cheng, Spyros Hirdaris. Improvement of Ship Safety through Stability Research and Innovations / The 11th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 23-28 September 2012, Athens, Greece

21. Mirosław Gerik. Design and operational problems of safety of surface naval and merchant ships in damaged conditions / Gdansk University of Technology. Annual Of Navigation , 2007 Vol.12

22. Klanac, Alan & Varsta, Petri. (2011). Design of marine structures with improved safety for environment. Reliability Engineering & System Safety. 96. 75-90. 10.1016/j.ress.2010.06.016.

23. Yamada, Yasuhira & Endo, Hisayoshi & Pedersen, Preben. (2008). Effect of Buffer Bow Structure In Ship-Ship Collision. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2018. p.133-141

24. Wołoszyk, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2023). A simplified method to assess the impact of ship-to-ship collision on the risk of tanker ship hull girder breaking accounting for the effect of ageing. s.413-419. URL: https://doi.org/10.1201/9781003462170-50 (data zvernennia 16.12.2023)

25. Cecilia Österman. Developing a value proposition of maritime ergonomics: Doctoral dissertation/ Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden, 2012. 78 p.

26. Veronica Jaramillo Jimenez, Noureddine Bouhmala, Anne Haugen Gausdal. Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. Journal of Ocean Engineering and Science, Volume 5, Issue 4,2020, Pages 358-386, ISSN 2468-0133, URL: https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003 (data zvernennia 16.12.2023)

27. Bikhngjie Guo, Prateek Gupta, Sverre Steen, Hans Anton Tvete. Evaluating vessel technical performance index using physics-based and data-driven approach. Ocean Engineering, Volume 286, Part 2, 2023, ISSN 0029-8018, URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115402. (data zvernennia 16.12.2023)

28. Vindex Domeh, Francis Obeng, Faisal Khan, Neil Bose, Elizabeth Sanli. A novel methodology to develop risk-based maintenance strategies for fishing vessels. Ocean Engineering, Volume 253, 2022, 111281, ISSN 0029-8018, URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111281.(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822006758) (data zvernennia 16.12.2023)

29. Shumilova K.V. Realizatsiia stratehii kiberbezpeky v systemi upravlinnia bezpekoiu sudna: dys. kand.tekh.nauk. Natsionalnyi universytet «Odeska morska akademiia», Ukraina, 2020.

30. Kondrashov K.V. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avariino-poperedzhuvalnoi systemy sudna: dys. doktor filosofii: 681.518.5. Kherson, 2021. 165 s.

31. Katie Aylward. Automated Functions: Their Potential for Impact Upon Maritime Sociotechnical Systems. Report no 2020:01. Department of Mechanics and Maritime Sciences. Chalmers University of Technology, SE-412 96. Gothenburg, Sweden, 2020. 64 p.

32. N.Q.H. Tran, I. Prodan, E.I. Grøtli, L. Lefèvre. Potential-field constructions in an MPC framework: application for safe navigation in a variable coastal environment. IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 20, 2018, Pages 307-312, ISSN 2405-8963, URL: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.049 (data zvernennia 16.12.2023)

33. Zhendi Mu. Safety analysis of OOG cargo stowage and securing on flat rack: Doctoral dissertation / World Maritime University. Dalian, China, 2021. 94 p.

34. Sifang Zeng. Risk assessment on carriage of maritime dangerous goods in packaged form by ship: Doctoral dissertation / World Maritime University. Dalian, China, 2016. 56 p.

35. Karianskyi S. A. Obespechenye эkspluatatsyonnыkh kharakterystyk vыsokoplotnыkh tekhnycheskykh zhydkostei pry ykh transportyrovke morskymy sudamy / S. A. Karianskyi, D. N. Marianov // Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu : Zb. nauk. prats, 2020. – Vyp.

1(61). – S. 97-105. URL: https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105. (data zvernennia 17.12.2023)

36. Marianov D. N. Povыshenye эffektyvnosty funktsyonyrovanyia spetsyalnыkh system spetsyalyzyrovannыkh morskykh sudov // Universum: Tekhnycheskye nauky : эlektron. nauchn. zhurn. – 2020. – № 4(73). URL: http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9291 (data zvernennia 16.12.2023)

Chymshyr V.I., Danylenko O.B., Shulga Y.M.

SAFETY OF NAVIGATION IN MARITIME AND INLAND WATERWAY TRANSPORT AS AN OBJECT OF SCIENTIFIC RESEARCH

In today's global economic market, the role of maritime and inland waterway transport is becoming extremely important, as more than 80% of international trade is carried out by sea. The growth in the number of ships and their characteristics requires enhanced measures to improve shipping safety. The problem is becoming especially urgent due to the digital transformation and the revolution in information technology, as well as in the face of unpredictable natural conditions and heavy traffic.

In the context of the importance of shipping safety, it is important to develop technologies that affect shipping volumes, as well as regulation and management standards. In particular, the problems of technical and human factors, as well as digitalization in the shipping industry, which are affected by total digital transformation, determine the relevance of the issue.

It is noted that the incompatibility of regulations and the lack of relevant international standards for shipping management can lead to danger. In particular, the human factor is recognized as a major factor in ship accidents, and the International Maritime Organization focuses on crew safety.

Ukraine, which is facing a blockade of its seaports due to military aggression, is finding it necessary to improve safety not only in the waters of its seaports but also on the Dnipro River. The situation creates the need to analyses and reduce the impact of factors that significantly affect the level of safety of navigation.

The purpose of the article is to summarize the results of scientific research to determine

***Key words**: safety of navigation, sea and inland waterway transport, international trade, international standards, technical factor, human factor, regulations, information technology, digital transformation, ship accidents, shipping regulation*

УДК 629.783:528.88 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.25

Трофименко І.В., Урум Н.С., Іваненко В.М., Федунов В.М.

ВИКОРИСТАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕБЕСНИХ СВІТИЛ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ МОРСЬКИХ СУДЕН

Метою статті є обґрунтування необхідності розробки та впровадження на суднових астронавігаційних систем для підвищення надійності навігації морських суден при виході з ладу систем глобального позиціювання. Поставлена мета досягається шляхом проведення аналізу уразливості глобальних навігаційних супутникових систем як основного засобу для визначення місця судна в сучасному судноплавстві; проведення оцінки реального стану морехідної астрономії як можливої альтернативи глобальним навігаційним супутниковим системам під

час визначення місця судна у відкритому морі; доведення можливості застосування інфрачервоного діапазону хвиль в астронавігаційних системах на борту морського судна для підвищення ефективності морехідної астрономії. Доведені переваги ІЧ-діапазону перед оптичним для визначення місцеположення морських суден, що виражаються у незалежності від яскравості фону денного неба, суттєво меншої залежності від гідрометеоумов, насамперед від вологості, вищою прозорістю атмосфери у спектральних вікнах під час переходу з видимої в ближню ІЧ-область спектра. Показано, що найкращими для використання в астронавігаційних системах є інфрачервоні зірки пізніх спектральних класів К, М, N, С в ближній ІЧ-області за характеристиками кількості, розподілу по всій небесній сфері, стаціонарністю інфрачервоного зображення і постійністю зоряної величини. Показані «вікна прозорості» атмосфери Землі в ближній інфрачервоній області спектра. Математично обґрунтована ємність оптимального каталогу навігаційних світил для спостереження в ближній інфрачервоній області спектра, для відмічених діапазонів прозорості наведені дані щодо зоряних величин для найяскравіших навігаційних світил. Найбільш суттєвим результатом є розробка структури астронавігаційної системи морських суден для автоматизованого визначення координат місця судна за допомогою стеження за небесними природними орієнтирами (зірками і планетами), вимірювання астронавігаційних параметрів та обробки результатів вимірювань обчислювальним пристроєм системи. Подальшим напрямом роботи є надання пропозицій відносно побудови фотоприймача запропонованої системи.

Ключові слова: *навігація, небесне світило, інфрачервоний діапазон, морське судно, випромінювання, «вікно прозорості», астронавігаційна система.*

Постановка проблеми. Початок 90-х років XX століття ознаменувався стрімким розвитком супутникової навігації в усьому світові і в Україні, зокрема. І хоча навігація – це приблизно лише 15% від загальної економічної вигоди у 1,4 трильйона доларів, що надає GPS, ніхто не хоче залишати такий солоденький пиріг іншому гравцеві. Навігація судна за допомогою GPS підвищує безпеку судноплавства, розвантажує судноплавні шляхи, дозволяє уникати зіткнень. Тріумфальна хода GPS на водному транспорті спричинила різке скорочення публікацій у галузі розробки та впровадження астронавігаційних систем як альтернативного джерела навігаційної інформації у складі навігаційних комплексів на суднах торгового ті пасажирського флоту. Це пояснювалося дуже просто – у порівнянні з глобальними навігаційними супутниковими системами (ГНСС) астронавігаційні при дещо меншій точності мають суттєво нижчу ймовірність використання. Тому є свої причини: часті зміни хмарності і непостійний рівень освітленості неба заважають використанню цих систем в оптичному діапазоні хвиль, а обмежена кількість радіоастроорієнтирів – у радіоканалі.

За фактом сталося, що сучасну навігацію всіх суден здійснюють ГНСС, які частково дублюють інерціальні навігаційні системи (ІНС). Альтернативи, як говориться, немає. Разом з тим, і використовувані системи навігації мають недоліки. Так, для ІНС потрібна постійна корекція. Що стосується ГНСС, то не дивлячись на їх безперечні переваги, вони виробляють високоточну корекцію тільки координат місцеположення судна та, головне, можуть бути знищені або блоковані противником під час ведення бойових дій, чи вносити такі похибки, які не дозволять здійснювати стійку навігацію. Саме до такого стану ми вперше наблизилися у теперішній час. І хоча партнери поки постійно надають точну навігаційну інформацію, не можна виключати можливості впливу противника на їх СНС та внесення збоїв та проблем в їх функціонуванні. Тоді можуть виникнути дуже серйозні наслідки під час плавання в будь-яких акваторіях Світового океану. І вони вже виникають. Ось декілька прикладів останніх років.

У звіті Центру передових оборонних досліджень (Foreign Policy) йдеться про регулярний спуфінг, тобто трансляцію фальшивого сигналу GPS та інших ГНСС в певному місці для введення в оману приймачів GPS/ГНСС. Найчастіше випадки маніпулювання сигналами GPS та інших ГНСС пов'язані з російською, китайською та іранською владою.

Так, при відкритті моста між Росією і Кримом, судна, що перебували поблизу, раптово

отримали повідомлення від своїх GPS/ГНСС-приймачів про знаходження за десятки кілометрів від свого фактичного місцезнаходження [1].

У грудні 2019 року у журналі Scientific American Пол Талліс описує вразливості GPS і наслідки, які можуть виникнути при її виведенні з ладу на широкому рівні. І у цьому сенсі проблеми навігації покажуться лише квітками: багато об'єктів критичної інфраструктури покладаються на часові мітки GPS. Інші ГНСС-системи мають наземні резервні системи, а GPS – ні, що вимагає найскорішого створення резервної системи eLORAN [1].

А ось повідомлення про Китай, свіженьке, від листопада 2019 року. Хтось підробляє GPS-сигнали в Шанхаї, але не з'ясовано, як вони змінюють GPS-координати суден.

Зонами небезпеки є східне і центральне Середземне море, Суецький канал, Перська затока, Ормузька протока та Оманська затока, де судна можуть зіткнутися з перешкодами GPS, підробкою зв'язку або іншими перешкодами зв'язку.

Крім того, у звіті C4ADS йдеться про те, що російські підробки сигналам загрожують безпеці судноплавства у Російській Федерації, Криму і Сирії. Отже судна, які плавали в цих регіонах, могли відчувати незвичні перешкоди у роботі GPS [1].

Крім того, природні аномалії та активність Сонця також можуть негативно позначитися на функціональних можливостях ГНСС.

Отже, у разі неможливості виконувати навігацію за допомогою приладів GPS необхідно застосовувати класичні методи морехідної астрономії, які можна реалізувати не тільки вручну, а й з використанням автоматизованих суднових астронавігаційних систем.

Тому з повною впевненістю можна вважати, що на використанні астрономічних засобів корекції, що мають порівняні з СНС характеристики, зарано поставили крапку. Крім Сонця і Місяця, є багато космічних джерел випромінювання, і не тільки в оптичному діапазоні, які можна використовувати для розв'язання цієї проблеми. Для того щоб навігаційна система не залежала від хмарності та освітленості неба, необхідно уважно придивитися на природні космічні джерела електромагнітного випромінювання. Мова йде про прикладні аспекти використання властивостей небесних світил в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні (не тільки теплове випромінювання, а й нетеплові механізми [2-4]) та інших космічних джерел радіовипромінювання – у радіодіапазоні. Вище вказані факти підкреслюють актуальність піднятого питання та необхідність проведення подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для обґрунтування необхідності впровадження на морських суднах астронавігаційних систем і розробки основних принципів побудови такої системи необхідно провести аналіз можливості використання інфрачервоного діапазону випромінювання небесних світил для навігації морських суден та стану робіт у даній предметній області.

Робота [1] присвячена розгляду загальних питань щодо принципів та прикладів застосування спуфінгу, що призвели до проблем у навігації морських суден.

У роботах [2-4] розглядаються перспективи використання ІЧ- та радіодіапазону для навігації транспортних засобів, у т. ч. морських суден.

У роботах [5-7] наведені відомості щодоприкладних аспектів використання хвиль ІЧ-діапазону для авіаційних навігаційних систем у складних метеорологічних умовах.

Роботи [8, 9] містять дані про блиск (зоряні величини) небесних світил Сонячної системи та віддалених зірок в оптичному діапазоні, які можуть використовуватися у прикладних завданнях навігації.

Особливості кліматичних умов та переваги застосування проміжного ІЧ-діапазону у приполюсних районах Арктичного басейну розглянуті у роботах [10, 11].

У роботі [12] сформульовані основні завдання та принципи побудови суднової астронавігаційної системи і характеристики, які можуть бути досягнуті цією системою.

Метою дослідження є обґрунтування необхідності розробки та впровадження на суднових астронавігаційних систем для підвищення надійності навігації морських суден при виході з ладу систем глобального позиціювання.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз уразливості ГНСС як основного засобу для визначення місця судна в сучасному судноплавстві;

– провести оцінку реального стану морехідної астрономії як можливої альтернативи ГНСС під час визначення місця судна у відкритому морі;

– довести можливості застосування ІЧ-діапазону хвиль в астронавігаційних системах на борту морського судна для підвищення ефективності морехідної астрономії.

Основні результати дослідження. Неможливість визначення місця судна у відкритому морі з використанням ГНСС штовхає судноводія на застосування класичних засобів (секстант) і методів (висотний, азимутальний, різницево-азимутальний, швидкісно-висотний, швидкісно-азимутальний, висотно-азимутальний) морехідної астрономії. На жаль, усі ці методи вимагають наявності спеціальних пристроїв для вимірювання з досить високою точністю астронавігаційних параметрів світил. А це важко, а іноді неможливо, робити вночі та у складних метеоумовах.

Підвищення ефективності використання астрономічних способів для навігації суден передбачає застосування сучасних високотехнологічних технічних засобів і методів обробки астронавігаційної інформації. Так, перехід від класичного навігаційного секстану на використання радіосекстану підвищує ймовірність правильного визначення місця розташування судна з 0,07 до 0,75, а на використання радіооптичного секстану – до 1.

Аналіз типової послідовності дій судноводія під час визначення місця судна або поправки курсовказівки показав, що за традиційної методики ручного опрацювання астрономічних спостережень близько 40% часу витрачається на обчислення місцевих годинникових кутів і схилень світил. Реальну допомогу надає автоматизація оброблення вимірювань, але вона є частковою и не стосується виконання вимірювань. Отже, для підвищення ефективності використання методів морехідної астрономії необхідно збільшити кількість вимірюваних астронавігаційних параметрів шляхом використання спеціальних технічних засобів вимірювань та їх обробки.

Як відомо, ІЧ-діапазон спектра поширюється від видимого (від 0,39 мкм до 0,76 мкм з ефективною довжиною хвилі $\lambda_o = 0{,}55$ мкм у максимумі оптичного спектра) до радіодіапазону (довжина хвилі більше 1,0 мм). Тобто ІЧ-діапазон спектра займає інтервал від 0,76 мкм до 1,0 мм [2-5]. При розрахунках видимості небесних світил сигналів враховують силу світла й атмосферні умови у видимому діапазоні світлових хвиль за умови забезпечення порогової освітленості на зіниці ока спостерігача. Прозорість атмосфери значною мірою змінюється при добових коливаннях температури та вологості повітря. Атмосфера Землі – це суміш газів, водяної пари та зважених частинок аерозолів – краплинок води, частинок диму, пилу тощо розміром від $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ мкм, саме які найсуттєвіше впливають на умови проходження випромінювання в атмосфері. Більше 90% водяної пари зосереджено в нижньому шарі атмосфери (до висоти у 5 км). Розсіювання променевої енергії частинками, розміри яких значно менші довжини хвилі випромінювання, суттєво знижується. Саме цим і пояснюється краще походження ІЧ-випромінювання порівняно з видимим [6]. Розміри крапель води, льоду, пилу та ін., менші за довжину хвилі світлового випромінювання, дозволяють світлу з більш довгими хвилями проходить через атмосферу. Тобто пропускання атмосферою променів довгих хвиль дозволяє застосовувати ІЧ-діапазон випромінювання [7]. Аналіз проходження хвиль різної довжини ІЧ-випромінювання небесних світил дозволяє з'ясувати вимоги для приймальних пристроїв, узгодити характеристики фотоприймача з «вікнами прозорості (видимості)» атмосфери [5]. Через ці вікна здійснюється пропускання ІЧ-випромінювання під час проходження атмосфери Землі, де їх більша частина поглинається молекулами водяної пари і вуглекислого газу.

Чому фахівці знову цікавляться ІЧ-діапазоном хвиль? Відповідь проста – це можливість обсервації світил у денний час доби та сутінки, в тумани і крізь малопотужні хмари з низькою вологістю, при значно нижчій висоті світил ($h \geq 10°$ для ІЧ-каналу на відміну від $h \geq 15°$ для

оптичного). Усі ці переваги ІЧ-діапазону пояснюються незалежністю прийому від яскравості фону денного неба, суттєво меншою залежністю від гідрометеоумов, насамперед від вологості, вищою прозорістю атмосфери у спектральних вікнах під час переходу з видимої в ближню ІЧ-область спектра. Отже, при створенні автоматизованих оптико-електронних каналів навігаційних систем, що працюватимуть в умовах денних фонових засвічень, головна роль відводиться вибору оптимального спектрального діапазону.

На вибір оптимального спектрального ІЧ-діапазону впливає низка чинників: абсолютні значення потоків випромінювання від навігаційних світил і фонового випромінювання неба та їх співвідношення, кількість і обсяги газів, аерозолів та твердих частинок в одиниці об'єму повітря, що визначають прозорість земної атмосфери, температура, пора року, географічне розташування, можливості фотоприймальних пристроїв за спектральною і пороговою чутливістю, наявність потрібної кількості світил в обраному діапазоні.

Співвідношення між довжиною хвилі ІЧ променевого потоку і розмірами атмосферних частинок викликає молекулярне (на досить малих частинках), дифракційне (на частинках, порівняних з довжиною хвилі) і геометричне (на частинках відносно великих розмірів) розсіювання. ІЧ-випромінювання, проходячи через атмосферу, через резонансність його частоти хвиль для багатоатомних молекул атмосферних газів і водяної пари вибірково поглинається ними, особливо парами H_2O, CO_2 та O_3.

У приземному шарі атмосфери смуги поглинання парів води перекривають смуги поглинання інших газів. Смуги поглинання водяної пари відповідають ділянкам спектра поблизу довжин хвиль 0,92; 1,13; 1,4; 1,88; 2,7; 3,2; і 6,3 мкм.

Вуглекислий газ потужно поглинає хвилі з довжинами 2,7; 4,3; і 14,5 мкм. Остання смуга поглинання шириною 13 – 17 мкм поряд із спектром поглинання водяної пари при $\lambda > 17$ мкм є основною причиною непрозорості атмосфери для ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі $\lambda > 14$ мкм.

Хоча найсильніше озон поглинає ІЧ-хвилі з довжиною 9,6 мкм, через незначний вміст озону в атмосфері його поглинаючою здатністю можна зневажати.

Приземні шари атмосфери завжди утримують у зваженому стані тверді і рідкі частинки, що утворюють хмари, тумани й атмосферні опади. На цих частинках відбувається геометричне і дифракційне розсіювання ІЧ-випромінювання, характер та інтенсивність якого залежить від співвідношення між радіусом частинок r, що розсіюють, і довжиною хвилі падаючого випромінювання λ. Через те, що кількості води у дощових краплях як мінімум у 5 разів менше, ніж води, що знаходиться в атмосфері у вигляді водяної пари, й вибіркове поглинання в краплях води є незначним у порівнянні з вибірковим поглинанням у водяній парі. Тобто, дощ не викликає помітного збільшення вибіркового поглинання у «вікнах прозорості».

З погляду на вказані чинники, для астронавігації за небесними світилами у світлий час доби можливе використання області ближнього ІЧ-випромінювання (0,7-4,0 мкм). Як відомо, яскравість фону неба зумовлена розсіюванням сонячного випромінювання в атмосфері, і вона зменшується зі збільшенням довжини хвилі випромінювання. Крім того, саме у цій ділянці спектра значна кількість світил випромінюють більшу частину своєї енергії. Хоча H_20, CO_2 та інші речовини активно поглинають ІЧ-випромінювання, є «вікна прозорості» (0,95-1,1; 1,2-1,3 мкм; 1,4-1,7 мкм; 2,0-2,5 мкм; 3,0-4,2 мкм) у ближній ІЧ-область спектра. Причому лише за довжин хвиль $\lambda_0 > 4$ мкм теплове випромінювання атмосфери починає суттєво впливати на яскравість неба. Наприклад, яскравість фону денного неба у вікні прозорості атмосфери (2,0-2,5 мкм) приблизно в 100 разів менша, ніж у видимій ділянці спектра, що створює всі передумови для використання даного спектрального діапазону для вирішення завдань визначеного класу. Таким чином, при створенні комплексного оптико-електронного каналу астронавігаційної системи, в якій поєднана обробка інформації для пеленгації астроорієнтирів за центром або краєм світила у близьких, але різних, діапазонах хвиль, за ІЧ об'єкти можна прийняти природні космічні джерела випромінювання у спектрі $\lambda = 0{,}7 - 2{,}5$ мкм.

Аналіз свідчить, що далеко не всі космічні об'єкти підходять на роль джерел

випромінювання. Як це не дивно, саме Сонце і Місяць такі близькі, потужні, яскраві, не можуть застосовуватися у цієї ролі. Це викликано нестаціонарністю і розмитістю їхнього ІЧ-зображення та нечіткістю спостережуваності країв. Крім того, Місяць має фази, що також суттєво відбивається на його ІЧ-характеристиках. Що стосується планет сонячної системи, тут також є свої труднощі. Насамперед, вони пов'язані з їх власним орбітальним рухом навколо Сонця. Це викликає їх мінливість спостережуваності, відмінності широт місця спостереження на Землі і мінливість їхньої зоряної величини залежно від конфігурацій планет відносно Сонця і Землі.

У цьому зв'язку найкращими видаються інфрачервоні зірки пізніх спектральних класів K, M, N, C в ближній ІЧ-області. Вони характеризуються великою кількістю, рівномірним розподілом по всій небесній сфері, точковим стаціонарним інфрачервоним зображенням і постійною зоряною величиною. На рис. 1 зображені спектральні смуги реакції (світла) фотометрії Джонсона I, J, H, K, що відповідають «вікнам прозорості» атмосфери в ближній інфрачервоній ділянці спектра, з ефективними довжинами хвиль λ_o у цих вікнах [5].

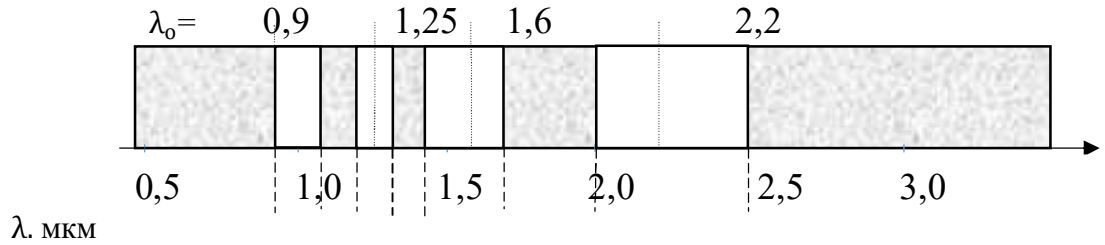


Рисунок 1 – «Вікна прозорості» атмосфери Землі в ближній інфрачервоній області спектра

Для створення робочого каталогу ІЧ-зірок необхідно визначити можливість роботи навігаційної системи у зоні пеленгування хоча б за одним світилом. Імовірність спостереження одного навігаційного світила $P_{хм}$ в просвітах хмарності бальності W залежно від загальної кількості навігаційних світил у зоні пеленгування n дорівнює:

$$P_{хм} = 1 - (0{,}1W)^n. \quad (1)$$

З формули (1) за зворотним перетворенням легко знайти загальну кількість навігаційних світил у зоні пеленгування, що забезпечує заданий рівень імовірності $P_{хм}$:

$$n = \frac{\lg(1-P_{хм})}{\lg(0{,}1W)}. \quad (2)$$

Загальна кількість навігаційних світил у каталозі N дорівнює:

$$N = \frac{4\pi}{\Omega_n} n, \quad (3)$$

де Ω_n – тілесний кут, охоплюваний зоною пеленгування навігаційних світил, величина якого дорівнює $\Omega_n = 4\pi(\sin h_{max} - \sin h_{min})$, де $[h_{min}; h_{max}]$ – граничні висоти зони пеленгування навігаційних світил.

Розрахунки за виразом (3) свідчать, що ємність оптимального каталогу навігаційних світил становить $N = 110 - 130$ одиниць для спостереження в ближній ІЧ-області спектра хоча б однієї зірки з імовірністю $P_{хм} = 0{,}99$ за хмарності $W = 9$ балів.

Для навігаційних каталогів небесних світил у різних діапазонах, у т. ч. I, J, H, K, вибирають найяскравіші зірки, рівномірно розподілені по небесній сфері. Так, для відмічених діапазонів наведені дані щодо зоряних величин $m = m(\lambda, N)$ для 110-130 найяскравіших навігаційних світил (табл. 1).

Таблиця 1 – Зоряні величини навігаційних світил у ближній ІЧ-області спектра

«Вікна прозорості»	I	J	H	K
Блиск (зоряні величини)	m_I	m_J	m_H	m_K
Діапазон блиску	$-2{,}5 \div +1{,}5^m$	$-3{,}0 \div +0{,}78^m$	$-3{,}7 \div -0{,}09^m$	$-4{,}0 \div -0{,}57^m$

Астронавігаційна система працюватиме без збоїв при виключенні зі списку найяскравіших навігаційних світил змінних зірок, подвійних зірок і зірок-перешкод, які мають різницю координат $\Delta\alpha \leq 5°$ і $\Delta\delta \leq 2°$ і утруднюють розпізнавання світил. Так, блиск (зоряні величини) небесних світил Сонячної системи в оптичному діапазоні наведений у таблиці 2 [8, 9], що дозволяє порівняти його з ІЧ-зірками.

Таблиця 2 – Блиск (зоряна величина) об'єктів Сонячної системи в оптичній області спектра

№ з/п	Об'єкт	Блиск (видима зоряна величина)	
		m_{max}	m_{min}
1	Сонце	$-26{,}8^m$	–
2	Місяць у повному місяці	− 12,7	–
3	Меркурій	− 1,5	$+1{,}9^m$
4	Венера	− 4,4	− 3,2
5	Марс	− 2,7	+ 2,0
6	Юпітер	− 2,4	− 1,4
7	Сатурн	− 0,9	+ 1,4
8	Уран	+ 5,7	+ 5,9
9	Нептун	+ 7,7	+ 7,8
10	Плутон	+ 13,7	+ 15,9

Для переходу з видимої (V) частини спектра в ІЧ-діапазон використовуються показники кольору V – I, V – J, V – H, V – K у розглянутому спектральному діапазоні. Це дозволяє оцінити блиск у будь-якій зі спектральних смуг: I = V – (V – I); J = V – (V – J); H = V – (V – H); K = V – (V – K). Для світил Сонячної системи використовують показники кольору для Сонця (табл. 3) [8].

Таблиця 3 – Стандартна фотометрична система для Сонця

V	V – I	V – J	V – H	V – K
$-26{,}75^m$	$+0{,}78^m$	$+1{,}06^m$	–	$+1{,}41^m$

Порівняльний аналіз таблиць 2 і 3 показує, що найбільший інтерес для навігаторів у ближньому ІЧ-діапазоні становлять Венера, Марс, Юпітер і Сатурн. Звісно, всі ці планети мають викладені вище недоліки. Але вони порівняні за зоряною величиною з найяскравішими ІЧ-зірками, що слід враховувати під час вибору каталогу навігаційних світил і розпізнавання астроорієнтирів.

Оптичний і міліметровий канали вимірювань значною мірою залежать від вологості та хмар. Порівняно з оптичним діапазоном проміжний інфрачервоний діапазон у меншому ступені залежить від вологості, що дає змогу використовувати ІЧ-канал у тумани. Через особливості приполюсного району Арктичного басейну, де превалюють сухі малопотужні хмари [10, 11], саме він є найбільш сприятливим для астроїзмережень в ІЧ-діапазоні.

Астронавігаційною системою називають засіб навігаційного устаткування морських суден, призначений для автоматизованого визначення координат місця судна за допомогою стеження за небесними природними орієнтирами (зірками і планетами), вимірювання астронавігаційних параметрів та обробки результатів вимірювань обчислювальним пристроєм системи.

Автоматизована суднова астронавігаційна система вирішуватиме такі завдання:

1) автоматичне формування площини штучного істинного горизонту;

2) розрахунок екваторіальних і горизонтальних координат світил для наведення на світило вимірювального пристрою;

3) наведення на світило вимірювального пристрою і вимірювання астронавігаційних параметрів у діапазоні випромінювання;

4) оброблення виміряної астронавігаційної інформації в реальному масштабі часу, відображення результатів цього оброблення та їх трансляція в системи автоматичного числення;

5) визначення місця судна, напрямку географічного меридіана, поправок систем і приладів курсовказівки;

6) визначення і зберігання точного часу;

7) оцінка природної освітленості.

Принципи побудови суднової астронавігаційної системи:

1) модульність, універсальність, компактність;

2) можливість одночасного автоматизованого вимірювання декількох астронавігаційних параметрів та комплексного застосування з іншими судновими навігаційними приладами і системами;

3) можливість зміни функціоналу у широкому діапазоні;

4) простота інтерфейсу;

5) автоматизоване періодичне оновлення астрономічних координат;

6) невисока вартість.

Сформульовані завдання суднової астронавігаційної системи і принципи її побудови дозволяють скласти структурну схему (рисунок 2).

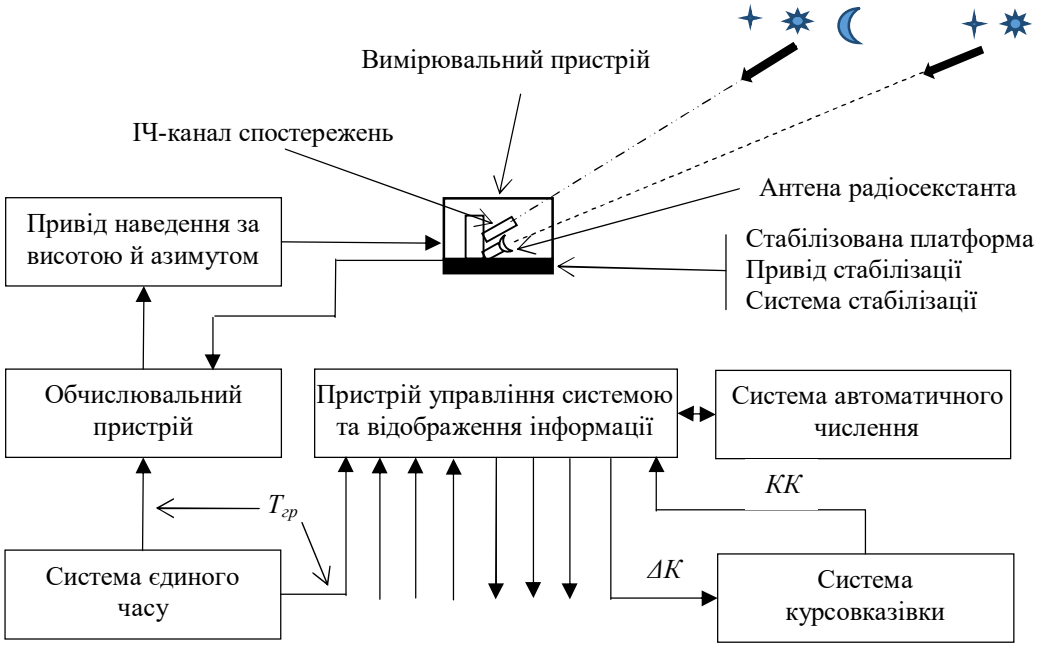


Рисунок 2 – Укрупнена структурна схема суднової автоматизованої астронавігаційної системи

В якості каналу спостережень вибрано інфрачервоний оптико-електронний автоматизований канал, який забезпечує вимірювання астронавігаційних параметрів понад 100 світил у діапазоні 0,7-2,5 мкм незалежно від яскравості фону неба в денний час доби і сутінки та меншою мірою залежить від метеоумов і стану повітряної маси земної атмосфери. Канал забезпечує імовірність визначення обсервованого місця судна близько 0,99 (за хмарності до 9 балів) [12].

Залишилося сформувати каталог навігаційних світил за даними щодо абсолютних спектральних розподілів енергії зірок у діапазоні ближнього ІЧ-випромінювання.

При створенні астронавігаційних систем велике значення приділяється фотоприймачам зображень у ближній ІЧ-області. У теперішній час використовують матричні різної спектральної та порогової чутливості. Для охоплення оптичного та ближнього інфрачервоного

діапазонів (λ = 0,4-2,5 мкм) слід застосовувати широкосмугові фотоприймачі, а повне охоплення цього діапазону вимагає застосування комбінації двох фотоприймачів. В якості порогової чутливості ІЧ-приймачів слід орієнтуватися на зоряні величини найслабших зірок (див. табл. 2).Ефемеридне забезпечення навігаційних світил ближньої ІЧ-області спектра не відрізняється від оптичного і вимагає лише доповнення деяких вихідних даних для ІЧ-зірок на певну епоху. Рефракція в ІЧ-діапазоні дещо вища, ніж в оптичному, що передбачає використання сучасної моделі ІЧ-рефракції.

Висновки.

1. Таким чином, методи і засоби морехідної астрономії є єдиними дублюючими стосовно ГНСС методами і засобами для визначення місця судна у відкритому морі. Своєю чергою, астрономічні методи можуть бути автоматизовані за допомогою астронавігаційних систем, що значно збільшить імовірність застосування цих методів, скоротить час і підвищить точність розв'язання навігаційних завдань.
2. ІЧ-хвилі проходять через прозору атмосферу, серпанку чи туман значно краще видимого світла за рахунок зменшення розсіювання більш довгими хвилями випромінювання при порівняно малих розмірах частинок, що замутняють атмосферу, що дозволяє їх використовувати у певних атмосферних умовах.
3. Збільшення якості спостереження досягається за рахунок використання тих довжин хвиль, що співпадають з «вікнами прозорості» атмосфери. З декількох «вікон прозорості» атмосфери у всьому ІЧ-діапазоні тільки два: 0,95–1,05 мкм і 8–13 мкм є найбільш широкими та прозорими. Але найкращими видаються інфрачервоні зірки у ближній ІЧ-області, що вимагає надання пріоритету «вікнам прозорості» у спектрі $\lambda = 0{,}7 - 2{,}5$ мкм. Таким чином, для досягнення максимального ефекту необхідно налаштувати характеристики фоторезисторних або фотодіодних матриць приладів спостереження з «вікнами прозорості» атмосфери, через які проходить максимальний потік ІЧ-випромінювання астрофізичних об’єктів.
4. Для забезпечення корекції курсу і координат місця судна до складу астронавігаційної системи має входити ІЧ-оптико-електронний автоматизований канал, що забезпечує вимірювання висот і азимутів 110-130 навігаційних світил у світлий і темний час доби. При цьому в умовах хмарності до 9 балів буде забезпечена ймовірність обсервації порядку P = 0,99.
5. Наявні дані щодо абсолютних спектральних розподілів енергії зірок у діапазоні ближнього ІЧ-випромінювання достатні для складання повного каталогу навігаційних світил для автоматизованого оптико-електронного каналу астронавігаційної системи, який працює за випромінюванням ІЧ-зірок усередині оптимального діапазону 0,7-2,5 мкм.

ЛІТЕРАТУРА

1. The Map Room. URL: https://www.maproomblog.com/ (дата звернення: 12.12.2023).
2. Elkins L., Sellers D., Monach W.R. The autonomous maritime navigation (AMN) project: Field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles. *Journal of Field Robotics*. 2010. Vol. 27(6). P. 790–818.
3. Paull L., Saeedi S., Seto M., Li H. AUV navigation and localization: A review. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*. 2014. Vol. 39(1). P. 131–149.
4. Meduna D.K., Rock S.M., McEwen R.S. Closed-loop terrain relative navigation for AUVs with non-inertial grade navigation sensors. In: *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2010 IEEE/OES*. IEEE, 2010. P. 1–8.
5. Головенський В.В. Збільшення дальності виявлення аеродромних променевих сигналів у складних метеорологічних умовах. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2018. №1. Т. 74. С. 53–60
6. Гаркавенко А.С., Зубарев В.В., Ленков С.В., Лукомский Д.В., Мокрицкий В.Л. Новые лазеры – методы, средства и технологии. Одесса : Астропринт, 2002. 280 с.
7. Головенський В.В., Лісовенко В.Д. Використання хвиль інфрачервоного діапазону для авіаційних навігаційних систем у складних метеорологічних умовах. *Збірник наукових праць*

Військової академії. Одеса, 2017. No 1(7). С. 31–34.

8. Satellite Based AIS. URL: https://www.kystverket.no/en/EN_Maritime-Services/Reporting-and-Information-Services/ais/Satellite-based-AIS/ (дата звернення: 12.12.2023).

9. Fiorini M., Capata A., Bloisi D.D. AIS Data Visualization for Maritime Spatial Planning (MSP). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. 2016. Vol. 5. P. 45–60.

10. Iphar C., Napoli A., Ray C., Alincourt E., Brosset D. Risk Analysis of falsified Automatic Identification System for the improvement of maritime traffic safety. In: *ESREL 2016 Conference Proceedings*. Glasgow, UK, 2016. P. 25–29.

11. Iphar C., Napoli A., Ray C. An expert-based method for the risk assessment of anomalous maritime transportation data. *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 104. P. 102337.

12. Madden R. USCG Rolling Out AIS Aids to Navigation: Are They Safe AND Secure? URL: https://gcaptain.com/uscg-ais-aton-navigation/ (дата звернення: 06.12.2023).

REFERENCES

1. The Map Room. (2023, February 12). https://www.maproomblog.com/

2. Elkins, L., Sellers, D., & Monach, W. R. (2010). The autonomous maritime navigation (AMN) project: Field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles. *Journal of Field Robotics*, *27*(6), 790-818.

3. Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. (2014). AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *39*(1), 131-149.

4. Meduna, D. K., Rock, S. M., & McEwen, R. S. (2010). Closed-loop terrain relative navigation for AUVs with non-inertial grade navigation sensors. *In 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles* (pp. 1-8). IEEE.

5. Holovenskyi, V.V. (2018). Zbilshennia dalnosti vyiavlennia aerodromnykh promenevykh syhnaliv u skladnykh meteorolohichnykh umovakh [Increasing the detection range of airfield beam signals in difficult meteorological conditions]. *Visnyk Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu*, Vol. 74., 1, 53-60. (in Ukrainian)

6. Harkavenko, A. S., Zubarev, V. V., Lenkov, S. V., Lukomskyi, D. V., & Mokrytskyi, V. L. (2002). Novye lazery – metody, sredstva y tekhnolohyy [New lasers - methods, tools and technologies]. *Astroprynt.* (in Russian)

7. Holovenskyi, V. V., & Lisovenko, V. D. (2017). Vykorystannia khvyl infrachervonoho diapazonu dlia aviatsiinykh navihatsiinykh system u skladnykh meteorolohichnykh umovakh [The use of infrared waves for aircraft navigation systems in difficult weather conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii*, *1*(7), 31-34. (in Ukrainian)

8. Satellite Based AIS. (2023, February 12). Kystverket. https://www.kystverket.no/en/EN_Maritime-Services/Reporting-and-Information-Services/ais/Satellite-based-AIS/

9. Fiorini, M., Capata, A., & Bloisi, D. D. (2016). AIS data visualization for maritime spatial planning (MSP). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, *5*, 45-60.

10. Iphar, C., Napoli, A., Ray, C., Alincourt, E., & Brosset, D. (2016). Risk analysis of falsified automatic identification system for the improvement of maritime traffic safety. In *ESREL 2016 conference proceedings*.

11. Iphar, C., Napoli, A., & Ray, C. (2020). An expert-based method for the risk assessment of anomalous maritime transportation data. *Applied Ocean Research*, *104*, 102337.

12. Madden, R. (2021, March 6). USCG rolling out AIS aids to navigation: Are they safe AND secure? gCaptain. https://gcaptain.com/uscg-ais-aton-navigation/

Trofymenko I.V., Urum N.S., Ivanenko V.M., Fedunov V.M.

USE OF THE INFRARED RADIATION RANGE OF CELESTIAL BODIES FOR NAVIGATION OF SHIPS

The purpose of the article is to substantiate the need to develop and implement astronavigation systems on ships to improve the reliability of navigation of ships in the event of a global positioning system failure. This goal is achieved by analysing the vulnerability of global navigation satellite systems as the main means for determining the location of a ship in modern navigation; assessing the real state of navigational astronomy as a possible alternative to global navigation satellite systems when determining the location of a ship on the high seas; proving the possibility of using the infrared waveband in astronavigation systems on board a ship to improve the efficiency of navigational astronomy. The advantages of the infrared range over the optical range for determining the location of ships have been proved, which are expressed in independence from the brightness of the daytime sky background, significantly less dependence on hydrometeorological conditions, primarily on humidity, and higher atmospheric transparency in spectral windows during the transition from the visible to the near-infrared spectral region. It is shown that infrared stars of the late spectral classes K, M, N, C in the near-infrared region are the best for use in astronavigation systems due to the characteristics of their number, distribution over the entire celestial sphere, stationarity of the infrared image, and constancy of the stellar magnitude. The «windows of transparency» of the Earth's atmosphere in the near-infrared region of the spectrum are shown. The capacity of the optimal catalog of navigational luminaries for observation in the near-infrared spectral region is mathematically substantiated, and data on stellar magnitudes for the brightest navigational luminaries are given for the marked transparency ranges. The most significant result is the development of the structure of the astronavigation system of marine vessels for automated determination of the ship's position by tracking celestial natural landmarks (stars and planets), measuring astronavigation parameters and processing the measurement results by the system's computing device. The further direction of work is to provide proposals for the construction of the photodetector of the proposed system.

***Keywords**: navigation, celestial body, infrared range, sea vessel, radiation, «window of transparency», astronavigation system.*

УДК 621.311:629.12/.13 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.26

Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Колесник В.В.

РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ДО ФІЛЬТРАЦІЇ НЕАКТИВНОЇ ТА АКТИВНОЇ НАПРУГИ НА ШИНАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Метою статті є розробка підходів до фільтрації напруги на шинах живлення в електроенергетичній системі судна, що дозволяє забезпечити повне усунення гармонійних складових струму і напруги в будь-яких живильних електричних мережах, як з нескінченними генеруючими потужностями, так і порівнянними з потужністю, споживаною навантаженням, при будь-яких, як лінійних, так і нелінійних навантаженнях. Поставлена мета досягається шляхом розробки двох підходів до фільтрації неактивної та активної напруги на шинах електропостачання в судновій електроенергетичній системі. Встановлено,

що одним з характерних рис сучасних суднових електроенергетичних систем є те, що вони містять значну кількість обладнання, такого як випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти і блоки безперебійного живлення, в яких вольт-амперні характеристики є нелінійними. Це обладнання генерує більш високі гармоніки струму і напруги, що негативно впливає на мережу живлення змінного струму. Ці гармоніки можуть спричинити резонансні явища в електроенергетичній системі судна, порушити роботу спеціальної комп'ютерної техніки, апаратів релейного захисту й автоматики, а також прискорити старіння ізоляції основного електрообладнання, що в результаті знижує надійність електропостачання споживачів автономного об'єкта. Тому все більша увага приділяється розробці засобів та методів активного керування генерацією та розподілом електроенергії згідно з певними вимогами, для забезпечення необхідної якості електроенергії та усунення взаємодії паралельно працюючого обладнання зі сторони живильної мережі. Найбільш суттєвим результатом є , по-перше, визначений спосіб генерації компенсаторного струму в електромережу, який забезпечує повну компенсацію неактивних складових струму споживача, по-друге, підхід до фільтрації напруги на шинах живлення, що забезпечує спільну роботу різко змінних потужних навантажень з електроприймачами, чутливими до спотворень напруги. Отже, встановлено, що використання навіть базових систем управління якістю електроенергії дозволяє забезпечити значне підвищення продуктивності мережі електропостачання, що стосується зокрема зварювального обладнання.

Ключові слова: *суднова електрична система, електрична мережа, струм, активна та неактивна напруга, лінійне та нелінійне навантаження, фільтрація.*

Постановка проблеми. Однією з характерних особливостей сучасних суднових електроенергетичних систем (СЕС) є наявність в їх складі значної кількості обладнання, такого як випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти і блоки безперебійного живлення, в яких вольт-амперні характеристики є нелінійними. Таке обладнання генерує більш високі гармонійні складові струму і напруги, що негативно впливає на мережу живлення змінного струму. Ці гармоніки можуть викликати резонансні явища в СЕС, порушити роботу спеціальної комп'ютерної техніки, апаратів релейного захисту й автоматики, а також призвести до прискореного старіння ізоляції основного електрообладнання, що в кінцевому результаті знижує надійність електропостачання споживачів автономного об'єкта.

Ці фактори значно знижують якість електроенергії на СЕС, чому також сприяють несприятливі енергетичні та фізичні умови самої автономної системи, такі як обмеженість потужності короткого замикання, сумірність вихідних і навантажувальних потужностей, мала довжина і високий опір кабельних ліній електропередач, а також відсутність силових трансформаторів на більшості СЕС. У зв'язку з цим сьогодні все більше уваги приділяється розробці методів і засобів, здатних усунути негативний вплив вищих гармонійних складових на електроенергію, забезпечити необхідну якість електроенергії і виключити взаємний вплив паралельного обладнання на електромережу. Це вимагає створення систем управління генерацією, передачею і розподілом електричної енергії.

Створення нових засобів автоматизації повністю проблему не вирішує, оскільки основні елементи електроенергетичних систем не володіють достатньою керованістю, що накладає певні обмеження на функціонування автоматичних засобів. Це призвело до зростання інтересу до активного управління процесами генерації та розподілу електричної енергії, що дає можливість надавати необхідні властивості всій електроенергетичній системі. Робота з такими інструментами вимагає проведення досліджень з метою пошуку оптимальних рішень для конкретних умов, розробки нових схем і алгоритмів управління традиційним обладнанням, які забезпечать його ефективне використання в електроенергетичних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто причини зниження якості електроенергії СЕС. Розроблено алгоритм роботи системи управління для зменшення амплітуди коливань енергообміну. При проведенні досліджень використовувалася математична модель і проводився експеримент в реальних умовах судна.

У роботі [2] розглянуто проблему виникнення енергообмінних коливань на морських електростанціях. Проведено експеримент і доведено адекватність розробленої математичної моделі паралельної роботи дизель-генераторів.

У роботі [3] розглянуто роботу багатогенераторної суднової енергетичної установки з точки зору існування в ній енергообмінних коливань. Для дослідження була розроблена математична модель і проведений експеримент в реальних умовах експлуатації.

У роботах [4, 5] розглянуто процеси динамічної компенсації реактивної енергії при пуску асинхронних двигунів від суднової електростанції порівнянної потужності. Наведено результати моделювання процесу прямого пуску електродвигуна без компенсації та з компенсацією струминного струму двигуна в умовах сумірності потужності генератора, зміни навантаження та компенсуючого пристрою. Проведено аналіз зміни активного і реактивного опору асинхронного двигуна при прямому і без прямого пуску.

У роботі [6] визначено, що розвиток морських інтегрованих енергетичних систем дозволив повністю електричному судну з електричними силовими установками живитися від дизель-генераторів. Крім того, в останні десятиліття з'являються судна з гібридними джерелами живлення постійного струму, такими як паливні елементи, суперконденсатор і акумулятор. Незважаючи на кілька досліджень, пов'язаних з гібридно-електричними суднами, інтеграція гібридних енергетичних систем та їх застосування для морської промисловості все ще вимагає додаткових дослідницьких завдань, оскільки концепції морської енергетики мають унікальні особливості, які відрізняються від відомих концепцій гібридних транспортних засобів щодо кількості генераторів та розміру, реакції системи та характеристик профілю навантаження. Зокрема, ефективне управління енергією з точки зору розподілу навантаження між різними гібридними джерелами живлення є однією з критичних проблем морської гібридної системи. У даній роботі запропоновано частотно-навантажувальний підхід для управління потужністю та розподілу навантаження в гібридних електричних суднах постійного струму. Основна ідея полягає в тому, що кожне джерело живлення має розрізняльну здатність щодо часу відгуку. Шляхом застосування декількох фільтрів низьких частот допустимий діапазон частоти навантаження для кожного джерела живлення може бути класифікований і розподілений на кожен контролер потужності.

У статті [7] розглянуто загальні питання, пов'язані із сумарними номінальними напругами та частотами для суден, що заходять у європейські порти, та їх розрахунковим попитом на електроенергію. Крім того, наведений приклад поромного судна, яке в даний час переобладнується для з'єднання з берегом, а також описані деякі деталі, що стосуються технічних рішень та екологічних переваг.

Разом з тим, у відомій літературі відсутні питання дослідження підходів до фільтрації напруги на шинах живлення в електроенергетичній системі судна.

Мета дослідження – розробка підходів до фільтрації напруги на шинах живлення в електроенергетичній системі судна, що дозволяє забезпечити повне усунення гармонійних складових струму і напруги в будь-яких живильних електричних мережах, як з нескінченними генеруючими потужностями, так і порівнянними з потужністю, споживаною навантаженням, при будь-яких лінійних і нелінійних навантаженнях.

Основні результати дослідження. Запропоновано спосіб генерації компенсаторного струму в електромережу, який забезпечує повну компенсацію неактивних складових струму споживача. Щоб зрозуміти основні принципи роботи системи управління якістю електроенергії, розглянемо еквівалентну схему роботи компенсатора, що працює в енергосистемі, наведену на рис. 1.

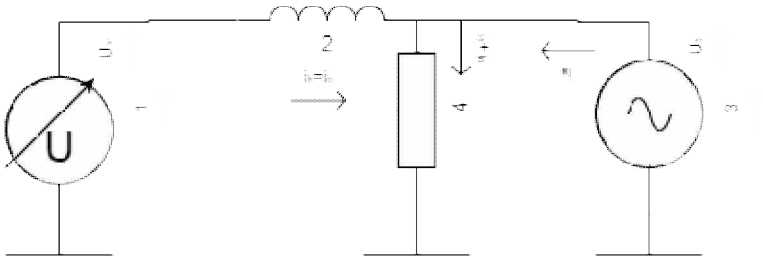


Рисунок 1 – Еквівалентна схема компенсатора

Схема заміщення складається з компенсуючого джерела напруги 1, споживача несинусоїдального струму 4, еквівалентного джерела напруги мережі живлення 3 і комутованого між ними реактора 2.

Електромагнітні процеси в такому контурі описуються таким диференціальним рівнянням:

$$u_v(t) = L\frac{di_k(t)}{dt} + u_c(t), \tag{1}$$

де $u_v(t)$ – миттєве значення напруги джерела компенсації;

L – індуктивність реактора;

$i_k(t)$ – миттєве значення струму компенсації;

$u_c(t)$ – миттєве значення напруги у вузлі мережі живлення.

Повна компенсація неактивних складових струму споживача може бути здійснена за умови, що

$$i_k(t) = -i_p(t), \tag{2}$$

де $i_p(t)$ – миттєве значення пасивної складової струму споживача.

Пасивну складову споживчого струму можна розрахувати відповідно до виразу

$$i_p(t) = i_n(t) - \frac{P_n}{U_{dc}^2}u_c(t), \tag{3}$$

де $i_n(t)$ – миттєве значення струму споживача;

P_n – активна потужність споживача;

U_{dc} – діюче значення напруги у вузлі мережі живлення.

Якщо замінити (3), враховуючи (2), в (1), тоді отримуємо

$$u_v(t) = -L\frac{di_k(t)}{dt} + L\frac{P_n}{U_{dc}^2}\frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t). \tag{4}$$

Отримана таким чином напруга компенсаційного джерела 1, подана на реактор 2, підключений до вузла живлячої мережі, забезпечує вироблення необхідного компенсуючого струму в мережу живлення.

Розглядаємо, що справедливо для синхронної машини

$$e_v(t) = ki_v(t), \tag{5}$$

де k – коефіцієнт передачі синхронної машини;

$\boldsymbol{i_v(t)}$ – струм в обмотці збудження, а з урахуванням (4) – регулювання струму збудження, відповідно до

$$i_v(t) = -\frac{Ldi_k(t)}{kdt} + \frac{LP_n}{kU_{dc}^2}\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{3}u_c(t), \quad (6)$$

буде генерувати необхідний компенсуючий струм.

Відзначимо, що роль індуктивності реактора у даному випадку виконує індуктивність синхронного автомата.

Відзначимо, що відмінною рисою цього методу є повна компенсація неактивних складових струму споживача, що дає можливість відмовитися від фільтруючих пристроїв, підключених до вузла живлення, навіть при несинусоїдальному струмі споживача.

Для оцінки якісних характеристик системи автоматичного управління, що реалізує запропонований метод, записуємо (4) в символьній формі:

$$u_v(t) = -L\frac{di_k(t)}{dt} + L\frac{P_n}{U_{dc}^2}\frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_{v2}(t) - u_{v1}(t). \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що вихідний сигнал системи управління – це різниця між вихідними сигналами двох незалежних ланок.

Функція передачі першої ланки визначається як

$$K(D) = \frac{u_{v1}(t)}{i_v(t)}, \quad (8)$$

що має розмірність опору і є передавальною функцією ідеальної диференціюючої ланки. Заміна D на jw призводить до комплексного коефіцієнту передавання:

$$K(jw) = K(D)_{D=jw} = jwL. \quad (9)$$

Амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики першої ланки визначаються відповідно як

$$K(w) = |K(jw)| = wL, \quad (10)$$
$$\varphi(w) = \frac{\pi}{2}.$$

Передавальна функція другої ланки визначається як

$$K(D) = \frac{u_{v2}(t)}{u_c(t)} + L\frac{P_n}{U_{dc}^2}D, \quad (11)$$

що не має розмірності, і є передавальною функцією ідеальної форсуючої ланки. Комплексний коефіцієнт передавання задається як

$$K(jw) = K(D)_{D=jw} = 1 + jwL\frac{P_n}{U_{dc}^2}. \quad (12)$$

Амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики другої ланки визначаються відповідно як

$$K(w) = |K(jw)| = \sqrt{1 + w^2L^2\frac{{P_n}^2}{U_{dc}^4}}, \quad (13)$$
$$\varphi(w) = arctgwL\frac{P_n}{U_{dc}^2}.$$

Таким чином, система управління будується з елементів з позитивними параметрами, не має зворотного зв'язку, а, значить, є стабільною і має достатню стабільність зовнішніх показників.

Структурна схема системи автоматичного регулювання неактивних силових компонентів показана на рис. 2.

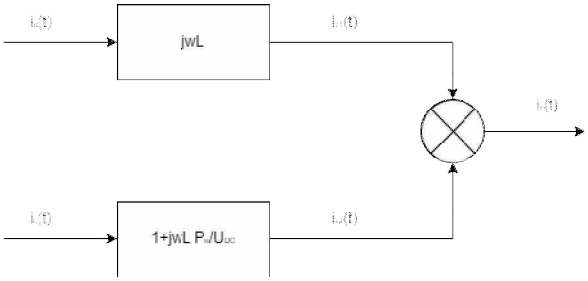


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання неактивних силових компонентів

Якщо компенсація всіх нелінійних навантажень в електроенергетичних системах суден, де вироблена потужність порівнянна з потужністю, споживаної навантаженням, з якихось причин неможлива, то попередній підхід вже не може забезпечити достатній коефіцієнт корисної дії.

У цьому випадку гармонійні струми, що протікають через нелінійне навантаження, викликають падіння гармонійної напруги при внутрішньому опорі джерела, в результаті чого крива напруги прикладається до навантаження, навіть якщо джерело напруги ідеально синусоїдальне.

Щоб виправити спотворення кривої напруги на блоці живлення, необхідно не допускати протікання гармонійних струмів через нелінійне навантаження і направляти їх по паралельній схемі, підключеної до джерела. Таким чином, буде досягнута більш стабільна крива напруги.

На рис. 3 показана схема заміщення для такого випадку. Паралельна схема тут представлена деяким імпедансом *K*. Гармонійний струм, створюваний нелінійним навантаженням I_{Lh}, ділиться на дві частини. Одна частина I_{Sh} протікає через гілку джерела, інша – по гілці з імпедансом *K*.

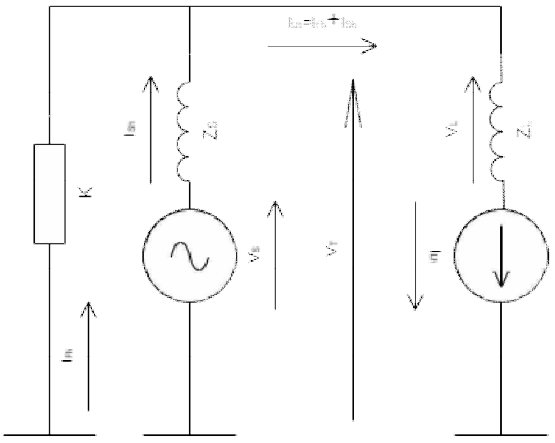


Рисунок 3 – Схема заміщення компонентів струму пасивного навантаження на шинах генератора

Виходячи з першого закону Кірхгофа, струм I_{Fh} в гілці з імпедансом K визначається як

$$I_{Fh} = I_{Lh} - I_{Sh}. \tag{14}$$

З іншого боку, виходячи з другого закону Кірхгофа, для ланцюга, зображеного на рис. 1, істинним є такий вираз

$$KI_{Fh} = Z_L I_{Lh}. \quad (15)$$

Заміна I_{Fh} з (14) на (15) призводить до такого результату:

$$KI_{Lh} - KI_{Sh} = Z_L I_{Lh}, \quad (16)$$

Звідки для струму гармонік I_{Sh}, що протікає через джерело, може бути записано

$$I_{Sh} = \frac{(K - Z_L)}{K} I_{Lh}. \quad (17)$$

Напругу на шинах, що живлять нелінійне навантаження, можна визначити як

$$V_T = V_S - Z_S I_{Sh}. \quad (18)$$

Аналіз виразу (17) показує, що при $|K - Z_L| \approx 0$ струм I_{Sh} також приблизно дорівнює нулю. Іншими словами, гармонійний струм перестає протікати через гілку джерела і повністю протікає через гілку з імпедансом K, тобто імпеданс K шунтує джерело на гармонійні складові нелінійного струму навантаження. Оскільки гармонійні складові нелінійного струму навантаження в цьому випадку вже не протікають через джерело, це не створює падіння гармонійної напруги при внутрішньому імпедансі джерела. Отже, форма кривої напруги на шинах V_T, що живлять, спотворюється. З виразу (18) випливає, що за вищевказаних умов $V_T \approx V_S$.

Технічно паралельна гілка з необхідним імпедансом K може бути реалізована за допомогою керованого джерела струму.

Якщо джерелом струму управляти таким чином, що зв'язок між струмом і напругою в паралельній гілці є таким самим, як і в гілці з потрібним імпедансом, то процеси в іншому ланцюзі не будуть залежати від того, імпеданс є біполярним активним або пасивним. Суть такої гілки полягає в тому, що вона буде функціонувати як фільтр активної потужності. Рис. 4 показує, як можна створити такий фільтр.

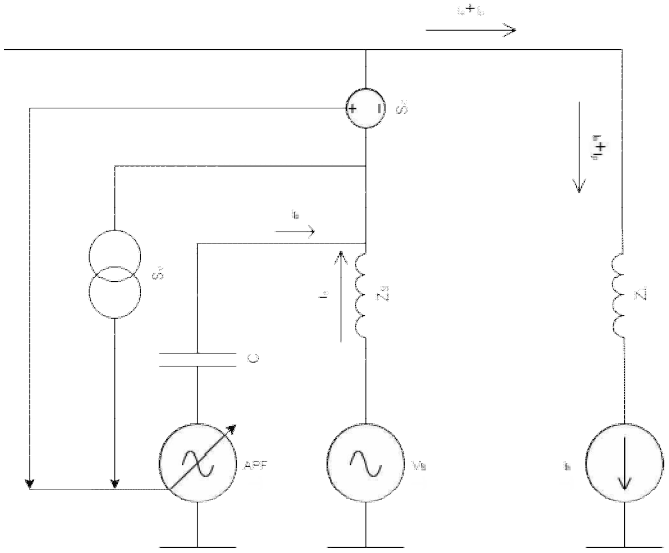


Рисунок 4 - Еквівалентна схема побудови силового активного фільтра

Активний фільтр працює так. Дані про напругу на клемах генератора потужності V_S і струму в живильних рейках від датчика напруги і датчика струму S_V надходять в систему управління активним фільтром APF. Силова схема активного фільтра відпрацьовує необхідний імпеданс. Таким чином, неактивні складові струму шин живлення протікають через активний

фільтр і не створюють падіння напруги на внутрішньому імпедансі генератора, що, у свою чергу, забезпечує синусоїдальну форму кривої напруги живлення на силових шинах V_T.

Аналіз осцилограм передбачуваного активного фільтра, напруги живлячої мережі (по-перше) і струму генератора (по-друге), отриманих в результаті комп'ютерного моделювання двох експериментів, показує, що до того, як активний фільтр почав свою роботу, напруга на напрямках живлення і струм генератора містили велику кількість гармонік. Гармонійний склад кривої струму генератора до того часу, коли активний фільтр почав свою роботу, схожий на гармонійний склад мережевого струму першого експерименту, так як в обох експериментах використовувалося одне і те ж навантаження. Однак, коли активний фільтр починає свою роботу, напруга на живильних рейках і струм генератора стають синусоїдальними. Зазначимо, що в цьому випадку амплітуда струму генератора зменшується, оскільки зі струму генератора зникають його неактивні компоненти.

Висновки. Таким чином, досліджено особливості електричних процесів, що відбуваються в електроенергетичних системах обмеженої потужності, що працюють на нелінійному навантаженні. Досліджено систему регулювання неактивних складових потужностей. Розроблено активний підхід до фільтрації напруги на шинах живлення, що забезпечує спільну роботу різко змінних потужних навантажень з електроприймачами, чутливими до спотворень напруги. Встановлено, що для досягнення найбільш ефективного використання енергетичних потужностей електрообладнання необхідне об'єднання статичних компенсаторів на шинах навантаження і активних фільтрів на шинах генератора. Тільки в цьому випадку можна домогтися суворої синусоїдальності як напруги, так і струму мережі живлення. Отже, встановлено, що використання навіть найпростіших систем управління якістю електроенергії дозволяє значно підвищити ефективність експлуатації мережі електропостачання за рахунок зварювального обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Савенко А. Е. Оптимизация работы судовой электростанции с целью повышения качества электроэнергии. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. No 6(111). С. 74–78.

2. Савенко О. Е. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. No 3. С. 58–62.

3. Савенко О. Е. Оптимізація роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. No 1. С. 131–134.

4. Муха Н. И., Павленко С. С., Дудко С. А. Компенсация реактивной энергии в судовой электроэнергетической системе при пусках асинхронных двигателей. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. No 3(19). С. 283–287.

5. Муха Н. И., Дудко С. А. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика.* 2011. Вип. 1/2011 (1). С. 96–97.

6. Load Frequency-Based Power Management for Shipboard DC Hybrid Power Systems. URL: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2728511/ISIE2020_HybridShip_Kwon_CameraReady.pdf?sequence=2 (дата звернення: 19.12.2023).

7. Borkowski T., Tarnapowicz D. «Shore to ship» system – an alternative electric power supply in port. *Journal of KONES. Powertrain and Transport.* 2015. Vol. 19. P. 49–58.

REFERENCES

1. Savenko, A. (2013). Optimizatsiya raboty sudovoy elektrostantsii s tsel'yu povysheniya kachestva elektroenergii [Optimization of the ship power plant to improve power quality]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*, 6(111), 74-78.

2. Savenko, O. (2011). Teoretichne ta eksperimental'ne doslidzhennya roboti

bahatoheneratornoyi sudnovoyi elektroenerhetychnoyi systemy [Theoretical and experimental study of the multi-generator ship power system]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu,* 3, 58-62.

3. Savenko, O. (2012). Optimizatsiya roboti bahatoheneratornoyi sudnovoyi elektroenerhetychnoyi system [Optimization of the multi-generator ship power system]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*, 1, 131-134.

4. Mukha, N., Pavlenko, S., & Dudko, S.(2012). Kompensatsiya reaktivnoy energii v sudovoy elektroenergeticheskoy sisteme pri puskakh asinkhronnykh dvigateley [Reactive power compensation in the ship power system during start-up of induction motors]. *Elektromekh. I energozberezhayuchi sistemi*, 3(19), 283-287.

5. Mukha, N., & Dudko, S. (2011). Analiz algorimov upravleniya sudovymi ustanovkami kompensatsii reaktivnoy energii [Analysis of control algorithms for ship reactive power compensation systems]. *Problemi enerhoresursozberezhennya v elektrotekhnichnikh sistemakh. Nauka, osvita I praktika*, 1/2011(1), 96-97.

6. Load Frequency-Based Power Management for Shipboard DC Hybrid Power Systems. (n.d.). Https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2728511/ISIE2020%5C_hybridship%5C_Kwon%5C_cameraready.pdf?Sequence=2

7. Borkowski, T., & Tarnapowicz, D. (2015). «Shore to ship» system – An alternative electric power supply in port. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 19, 49-58.

Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Kolesnyk V.V.

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO FILTERING INACTIVE AND ACTIVE VOLTAGE ON POWER SUPPLY BUSBARS IN THE SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

The aim of the article is to develop approaches to voltage filtering on power supply buses in the ship's electric power system, which allows to ensure complete elimination of harmonic components of current and voltage in any supplying electric power networks, both with infinite generating capacities and comparable to the power consumed by the load, under any linear and nonlinear loads. This goal is achieved by developing two approaches to filtering inactive and active voltages on power supply buses in a ship's electric power system. It has been established that one of the characteristic features of modern ship power systems is that they contain a significant amount of equipment, such as rectifiers, inverters, frequency converters and uninterruptible power supplies, in which the volt-ampere characteristics are non-linear. This equipment generates higher current and voltage harmonics, which adversely affects the AC power supply network. These harmonics can cause resonance phenomena in the ship's electrical power system, disrupt the operation of special computer equipment, relay protection and automation devices, and accelerate the aging of the insulation of the main electrical equipment, which ultimately reduces the reliability of power supply to consumers of an autonomous facility. Therefore, more and more attention are paid to the development of means and methods of active control of power generation and distribution in accordance with certain requirements to ensure the required power quality and eliminate the interaction of parallel equipment with the power grid. The most significant result is, firstly, a method of generating compensatory current to the power grid that ensures full compensation of inactive components of the consumer's current, and secondly, an approach to voltage filtering on the power buses that ensures joint operation of sharply variable power loads with electrical receivers sensitive to voltage distortions. Thus, it has been established that the use of even basic power quality management systems can provide a significant increase in the performance of the power supply network welding equipment.

Key words: *ship electrical system, power grid, current, active and inactive voltage, linear and nonlinear load, filtration.*

УДК 621.182.4:621.182.9 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.27

Войченко Т.О., Гімпель Р.М., Шевченко А.П., Маннапова О.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДКЛАДЕНЬ НА СТАН ТРУБ СУДНОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Метою статті є проведення моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб для підвищення ефективності захисту від корозії і утворення окалини поверхонь нагріву суднових котельних установок. Поставлена мета досягається шляхом аналізу особливостей формування накипу та відкладень. Встановлено, що при використанні води, що містить велику кількість мінералів, у суднових котельних установках під час їх експлуатації можуть утворюватися тверді осади, які називаються накипом. Цей накип має високу міцність, проте має низьку теплопровідність, що може призвести до технічних проблем та збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок. При розрахунку теплового стану труб зазвичай вважають термічний опір відкладень постійним (часто нульовим), не враховуючи того факту, що на початку експлуатації поверхні труб були чистими і працювали в інших умовах, ніж на кінець терміну служби. Тому, щоб належним чином оцінювати термін служби труб, потрібно враховувати товщину шару відкладень та їх склад при розрахунку теплового стану. Найбільш суттєвим результатом є визначення залежностей коефіцієнта еквівалентної теплопровідності від товщини осадового шару труб суднових котельних установок, різниці температур перетину труби суднових котельних установок від коефіцієнта еквівалентної теплопровідності, різниці температур по перетину труби суднових котельних установок від товщини осадового шару та тривалості роботи труб суднових котельних установок від інтенсивності утворення накипу. Результати дослідження можуть бути використані для розробки методів контролю стану труб та планування їх заміни, що дозволить підвищити ефективність експлуатації суднових котельних установок. Запропонований підхід до моделювання відкладень може бути застосований для оцінки теплового стану не тільки труб суднових котельних установок, але й трубопроводів інших систем під час їх тривалої експлуатації. Моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок засновано на запропонованому в статті наборі математичних виразів.

Ключові слова: *суднова котельна установка, моделювання, відкладення, накип, осад, нагрів, теплопровідність, труба, коефіцієнт, температура.*

Постановка проблеми. Під час експлуатації при використанні жорсткої води у суднових котельних установках на поверхнях нагріву з'являються тверді відкладення, що називаються накипом. Цей накип має високу міцність, але низьку теплопровідність, що може призвести до технічних проблем та збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок:

– відкладення і накип призводять до збільшення споживання палива і зниження коефіцієнта корисної дії котлів, що, в свою чергу, підвищує кількість шкідливих викидів в атмосферу;

– зупинка котла вимагає складної і дороговартісної процедури очищення від накипу та відкладень, а між очищеннями утворюється новий осад;

– тепловіддача накипу і відкладень є низькою, що викликає перегрів металевих поверхонь нагріву, що може призвести до деформацій, здуття та тріщин у трубах, аварій,

скорочення терміну між ремонтами і збільшення витрат на обслуговування суднових котельних установок;

– відкладення зменшують перетин труб, збільшуючи гідроопір, що призводить до додаткових витрат електроенергії для перекачування води через насосне обладнання суднових котельних установок;

– неправильне обслуговування та несвоєчасна чистка відкладень і накипу знижують термін служби суднових котельних установок в 2-3 рази, що призводить до непотрібних витрат на заміну тих котлів, що вийшли з ладу.

Таким чином, запобігання утворення накипу і захист від відкладень є однією з актуальних проблем, пов'язаних з експлуатацією суднових котельних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] визначено, що через відносно низьку ціну на дизель більшість суднових двигунів використовують дизельне паливо в якості суднового палива, але його викиди містять багато вуглецю. Для скорочення викидів вуглецю Міжнародна морська організація встановила індекс енергоефективності проекту та індекс енергоефективності для існуючих суден. У теперішній час популярним способом є зниження викидів за рахунок оптимізації характеристик теплопередачі котлів з відпрацьованими газами на нових суднах, але досліджень показника викидів котлів існуючих суден проведено недостатньо. Для існуючих ємностей зафіксована теплопровідність матеріалів котла-утилізатора й інші параметри. Тому основними факторами, що впливають на коефіцієнт тепловіддачі котла-рекуператора, є температура і витрата газів. Отже, у даній статті розглядається вплив температури і витрати відпрацьованих газів двигуна на коефіцієнти теплопередачі котла. По-перше, на основі збереження маси і енергії в якості основного рівняння створюється модель теплообміну котла з використанням методу гібридного моделювання і методу концентрованих параметрів. По-друге, для даного котла, оскільки інші параметри практично не змінюються, температура на вході і витрата моделі змінюються методом змінних напруги, а температура на виході з котла моделюється за алгоритмом випробувань. Новизна даного дослідження полягає в дослідженні вхідної температури і витрати котла-утилізатора діючого судна, і отримані відповідні результати, які дають теоретичне керівництво роботою котла-утилізатора.

У статті [2] зазначено, що для підвищення теплового ККД котла і зниження викидів оксинітриду пропонується нова система рекуперації тепла димових газів. Паровий насосний котел, оснащений системою рециркуляції димових газів, вперше використовується в практичній техніці. Окислювальне повітря перед процесом горіння попередньо нагрівається і зволожується, що викликає підвищення температури точки роси димових газів. Таким чином, зворотна вода котла може рекуперувати більшу частину відпрацьованого тепла димових газів. Коефіцієнт корисної дії (ККД) утилізації тепла системи може досягати 82,6%, що призводить до збільшення ККД котла на 7-8%. Крім того, підвищення вологості окислювального повітря і рециркуляція димових газів зменшують утворення оксинітридів. У результаті викид оксинітридів знижується з 129 мг/м³ до 23 мг/м³, що дає зниження на 82,3%. Газовий котел реалізує наднизький рівень викидів оксинітриду. Для котла потужністю 1,8 МВт річне споживання природного газу можна заощадити на 7-8%. З огляду на нинішні ціни на енергоносії запропонована система є економічно вигідною зі статичним терміном окупності в 1,2 роки. Загальна продуктивність системи надається як доказ потенційних переваг. Доведено, що запропонована система має переваги у сфері енергозбереження, зменшення викидів забруднюючих речовин та економічної вигоди.

У роботі [3] допоміжні котли на теплоходах є предметом досліджень. Пар виробляється допоміжним котлом для підігріву палива і турбінами для перекачування вантажного масла. Цей морський котел являє собою водотрубний допоміжний котел зі струменевим пальником і ККД

70-80%. Метою визначення процесу і складових втрати незворотності в системі є виявлення процесу і складових енергетичних втрат. Другий закон термодинаміки і поняття виробництва необоротної ентропії лежать в основі енергетичного методу аналізу цього дослідження. Ця концепція розгляду ентропії в даному стаціонарному стані, а не як зміни процесу, також є однією з особливостей цього енергетичного аналізу суднового рідкопаливного котла. Втрати енергії в камері згоряння були розраховані і визначені як 35,024 кДж, що є максимальною незворотністю в даному морському допоміжному котлі. Проведено чисельний аналіз сучасного струменевого пальника з форсункою для оцінки вдосконалення процесу горіння. Схема температура-швидкість витрати палива, що проходить через сопло пальника цього допоміжного котла, зображує розпилення.

На основі літературних джерел в статті [4] представлений аналіз конструктивних рішень суднових головних котлів, спрямованих на підвищення їх ККД. Особлива увага приділялася утилізації скидного тепла відпрацьованих газів, що виходять з котлів. За технічною документацією і результатами експлуатаційних випробувань були визначені характерні значення і технічні параметри: параметри і обсяг виробленої пари, економічність і продуктивність в залежності від виду палива, питома витрата палива.

У роботі [5] визначено, що нафтові відходи, що виникають при експлуатації морських електростанцій, відповідно до Марпольської конвенції, повинні збиратися на судні, а екіпаж зобов'язаний вести облік їх кількості в так званій нафтовій книзі. Зібрані відходи вивозяться на сушу або можуть використовуватися в якості палива на суднах. Фізико-хімічні властивості нафтових відходів, що містять різні види нафтових відходів, змішаних в різних пропорціях, важко визначити, що ускладнює вибір правильної температури нагріву для отримання необхідної в'язкості, що забезпечує належне розпилення і хорошу якість горіння. Крім того, нафтові відходи зазвичай містять велику кількість води, твердих викидів і коагулянтів, що виникають в результаті реакцій між різними типами нафтопродуктів, що входять до складу нафтових відходів. Нафтові відходи до і після гомогенізації піддавалися лабораторним випробуванням шляхом обробки мікроскопічних зображень їх проб за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми і спектрального аналізу для уточнення морфології відходів. Також були визначені фізико-хімічні властивості відходів. Результати проведених досліджень показали значну різноманітність фізико-хімічних властивостей і складу нафтових відходів, що вивозяться з суден.

У статті [6] встановлено, що дуже важливо точно досліджувати поведінку компонента морської води, особливо жорсткість Mg, контролювати якість бойлерної води морських котлів. А також важливо дослідити поведінку $PO4^{3-}$, особливо коли з ним співіснують Mg^{2+} і OH^{-}, щоб зробити авторський метод автоматичного управління більш здійсненним і надійним. Відповідно, у даній статті експериментально вивчається поведінка жорсткості Mg у співіснуванні OH^{-} та/або $PO4^{3-}$ та при змішуванні кремнезему. Експерименти проводилися в умовах однакового рівня розчину з критеріями якості води, прийнятими для реальних котлів, з використанням автоклава, температура і тиск якого регулювалися на тому ж рівні, що і реальні допоміжні котли.

У роботі [7] розглянуто розрахунок теплового балансу, який є основою для розрахунку термодинамічних характеристик турбованих суднових котлів. Оскільки турбокомпресор бере участь в термодинамічному процесі роботи котла, це може привести до більш складного розрахунку теплового балансу турбованого суднового котла. Запропоновано секційний метод розрахунку теплового балансу турбованого котла, а також аналіз і попереднє дослідження прямого теплового балансу і секційний метод розрахунку теплового балансу. Представлена загальна формула тепловтрат, яка може бути застосована до розрахунку змінного навантаження турбованого котла. Наведено формулу розрахунку наявної кількості теплоти палива, що

використовується для виконання робіт у допоміжній паровій турбіні, а також виконано розрахунок і аналіз конкретних випадків.

У статті [8] визначається, що в результаті технічного прогресу у 21 столітті судна з паровим двигуном з ККД від 36 до 38% були замінені суднами з дизельним двигуном з ККД до 55%. Відповідно, виробники головних котлів і парових турбін на суднах боролися за те, щоб їх продукція залишалася на ринку, модернізуючи їх конструкцію з метою підвищення конкурентоспроможності по відношенню до дизельних приводів. На основі огляду літературних даних у даній статті представлений аналіз підвищення ККД суднових котлів при використанні скидного тепла газів, що відходять з котлів. Розглядається корисність використання цього тепла для нагріву води, що подається в котли, а також використання нагрітого повітря у процесі горіння. При аналізі враховуються різні типи теплообмінників, що використовуються для цієї мети, а також різна ефективність котлів провідних виробників котлів. Використовувані розрахункові формули і методики використовуються при подальшому аналізі впливу використання скидного тепла на підвищення ККД котла.

Але у відомій літературі не розглянуті в повному обсязі саме питання дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок.

Мета дослідження – проведення моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб для підвищення ефективності захисту від корозії і утворення окалини поверхонь нагріву суднових котельних установок.

Основні результати дослідження. У ході функціонування суднових котельних установок з використанням жорсткої води на поверхні труб відкладаються речовини, які мають високу міцність, але низьку теплопровідність. Накопичення цих відкладень призводить до перегріву труб, що скорочує їх термін експлуатації на суднах. При розрахунку теплового стану труб зазвичай термічний опір відкладень приймають за постійну величину (часто нульову), не враховуючи того факту, що поверхні труб у початковий момент експлуатації є чистими і працюють в інших умовах, ніж у кінці періоду експлуатації. Тому, щоб правильно оцінювати термін служби труб, необхідно враховувати товщину шару відкладень і їх склад при розрахунку теплового стану.

Для визначення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності α_{egv} для труб з відкладеннями (рис. 1) використовується вираз (1) (труба з відкладеннями розглядається як багатошарова циліндрична стінка)

$$\alpha_{egv} = \frac{\ln\frac{d_2}{d_1}+\ln\frac{d_1}{d_{def}}}{\frac{1}{\alpha_t}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_{def}}\ln\frac{d_1}{d_{def}}}. \quad (1)$$

На рис.2 показана залежність коефіцієнта еквівалентної теплопровідності труби суднових котельних установок від товщини шару і значення коефіцієнта теплопровідності відкладень.

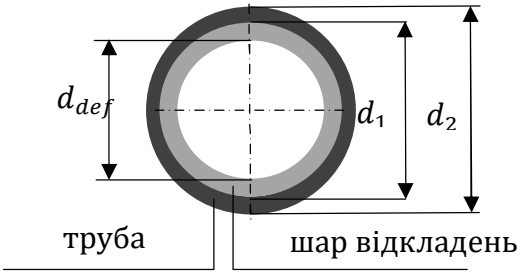


Рисунок 1 – Труба суднової котельної установки з шаром накипу та відкладень

Аналіз графіків на рис. 2 показує, що зі збільшенням товщини шару відкладень значення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності труб суднових котельних установок зменшується. Зниження коефіцієнта теплопровідності відкладень викликає додаткове зниження коефіцієнта еквівалентної теплопровідності.

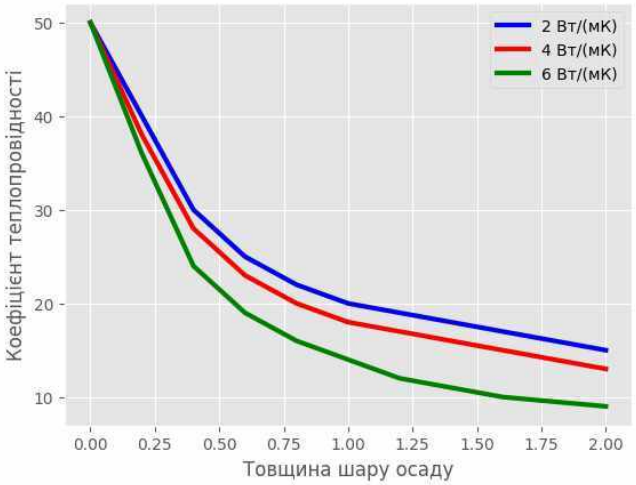


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта еквівалентної теплопровідності від товщини осадового шару труб суднових котельних установок

Практично незалежно від температури зовнішніх поверхонь труб, тепловий потік, який проходить через них в суднових котельнях, залежить в основному від конструкції котельні, умов контакту фаз та інших факторів, що не пов'язані зі станом їх внутрішніх поверхонь. Тому тепловий потік, що проходить через труби в суднових котельнях, буде майже однаковим, якщо порівняти чисту трубу та трубу з накипом. Отже, кількість тепла, передається по поверхні труб, в обох випадках буде однаковою; зміниться тільки значення температури напору Δt. Для чистої труби суднових котельних установок це значення буде значно менше, ніж для труби, що містить накип.

Щільність теплового потоку q, що залежить від коефіцієнта теплопровідності α_{egv} і температури напору між зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби суднових котельних установок з відкладеннями, можна визначити за виразом

$$q = \frac{2\alpha_{egv}\Delta t}{d_2 \ln\frac{d_2}{d_{def}}}. \quad (2)$$

При постійному зовнішньому діаметрі труби d_2 і незначно мінливому співвідношенні $\frac{d_{def}}{d_2} \approx \frac{d_1}{d_2}$ підтримується сталість значення теплового потоку при постійному значенні продукту $\alpha_{egv}\Delta t$. З огляду на цю обставину, легко визначити, наскільки буде змінюватися температура між зовнішньою і внутрішньою поверхнею зі збільшенням товщини осадового шару труби суднових котельних установок

$$\Delta t = \frac{d_2 \ln\frac{d_2}{d_{def}}}{2\alpha_{egv}} q. \quad (3)$$

На рис. 3 наведена залежність різниці температур Δt від теплового навантаження і коефіцієнта еквівалентної теплопровідності. З рис. 3 видно, що зі збільшенням товщини шару відкладень і зменшенням коефіцієнта їх теплопровідності різниця температур в товщині стінки труби суднових котельних установок збільшується. Збільшення теплового навантаження на зовнішню поверхню труби також призводить до збільшення різниці температур по товщині стінки труби.

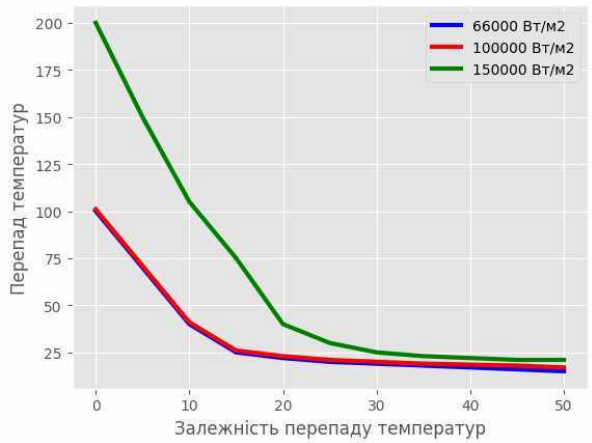


Рисунок 3 – Залежність різниці температур перетину труби суднових котельних установок від коефіцієнта еквівалентної теплопровідності

На рис. 4 показано вплив товщини осадового шару на різницю температур по товщині стінки труби суднових котельних установок. З рис. 4 видно, що зі збільшенням товщини осадового шару різниця температур товщини стінки труби збільшується. Тому, щоб підвищити температуру внутрішньої поверхні труби суднових котельних установок, яка знижується в результаті утворення відкладень, необхідно своєчасно збільшувати інтенсивність теплообміну, а при досягненні різниці температур по товщині стінки труби певного критичного значення – виводити з експлуатації.

З урахуванням співвідношень (1), (3) отримується залежність тривалості експлуатації труби суднових котельних установок перед очищенням внутрішньої поверхні від шару опадів

$$\tau_t = \frac{1.929*10^3 d_1}{a}\left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^b\right], \quad (4)$$

де a – інтенсивність утворення накипу;

b – const, що залежить від теплофізичних властивостей відкладень, матеріалу труб суднових котельних установок і різниці температур в товщині стінки труби.



Рисунок 4 – Залежність різниці температур по перетину труби суднових котельних установок від товщини осадового шару

Коефіцієнт, що було розраховано, використовується для визначення терміну служби труб в суднових котельних установках до очищення їх внутрішньої поверхні від осадового шару. Залежності між тривалістю експлуатації труб та інтенсивністю утворення накипу та допустимою різницею температур в товщині стінок труб були отримані за допомогою кореляції (4). На рис. 5 зображена залежність тривалості експлуатації труб у суднових котельних установках перед очищенням внутрішньої поверхні від інтенсивності утворення накипу. З рис. 5 можна зрозуміти, що зі збільшенням інтенсивності утворення накипу термін служби труб в суднових котельних установках до очищення скорочується.

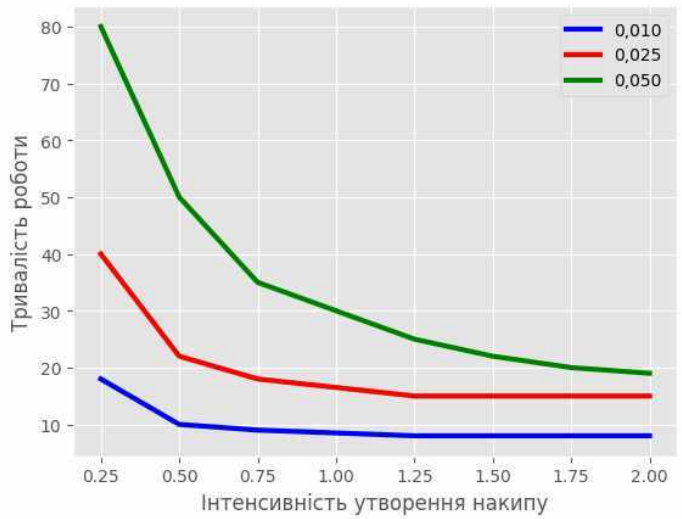


Рисунок 5 – Залежність тривалості роботи труб суднових котельних установок від інтенсивності утворення накипу

При визначенні допустимої різниці температур в стінці труби суднових котельних установок необхідно враховувати процес утворення накипу всередині труб. Для опису методів дослідження був використаний метод регулярного теплового режиму першого роду, який відрізняється простотою залежностей розрахунку, вимірювальної апаратури та експериментів. При застосуванні цього методу основною вимірюваною величиною є швидкість охолодження, яка характеризує відносну швидкість зміни температури тіла в часі.

Розрахункова залежність для експериментального визначення швидкості охолодження виглядає таким чином

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}, \tag{5}$$

де ϑ – надлишкова температура;

τ – поточний час.

Щоб визначити тепловий опір плівки, використовується формула

$$R_{\alpha_{egv}} = \frac{F'}{C'm} - \frac{1}{\omega}, \tag{6}$$

де m – швидкість охолодження досліджуваного зразка;

F' - площа поверхні зразка;

C' - теплоємність зразка;

ω – коефіцієнт теплопередачі зразка.

Коефіцієнт тепловіддачі плівки розраховується за виразом

$$k_{egv} = \frac{1}{R_{\alpha_{egv}}}. \quad (7)$$

Таким чином, проведене моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб суднових котельних установок базується на сукупності виразів (1) – (7).

Висновки. У даній статті було проведено дослідження впливу накипу на термін служби труб суднових котельних установок. Для цього було створено математичну модель теплообміну в залежності від товщини шару та складу відкладень на внутрішній поверхні труб. Було досліджено вплив товщини шару на тепловий стан труб та встановлено, що з метою зниження температури поверхні труби, необхідно підвищувати інтенсивність теплообміну. Було отримано залежності для визначення температурного ресурсу експлуатації труб в умовах наявності накипу на їх внутрішніх поверхнях у складних умовах суднових котельних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jiang D., Yu H., Wang Z. et al. Influence of Exhaust Temperature and Flow Velocity of Marine Diesel Engines on Exhaust Gas Boiler Heat Transfer Performance. *Sustainability*. 2022. Vol. 15. P. 753. DOI: https://doi.org/10.3390/su15010753. (date of access: 15.12.2023).

2. Men Y., Liu X., Zhang T. Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system. *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 254. P. 115201. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115201. (date of access: 05.12.2023).

3. Pal J., Sapali S., Anil T.R. et al. Exergy Criteria of Performance of Waste Heat Recovery Applied for Marine Auxiliary Boiler. *International Journal of Heat and Technology*. 2022. Vol. 40. P. 297–303. DOI: https://doi.org/10.18280/ijht.400135. (date of access: 19.12.2023).

4. Behrendt C. Development of main marine boilers' structures. In : GEOLINKS2019. 2019. B1/VI/13. (date of access: 11.12.2023).

5. Behrendt C., Jasiewicz R., Szczepanek M., Szmukała M. Combustion of petroleum waste in the marine boilers – Waste preparation technologies and exhaust emission. Part 1: *Preparation technologies and their influence on waste morphology. Fuel*. 2021. Vol. 305. P. 120966. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120966. (date of access: 07.12.2023).

6. Itami Y., Nishikawa E., Kamata T. et al. Behavior of Mg hardness in Boiler Water of Marine Auxiliary Boilers. *Journal of the marine engineering society in japan*. 1998. Vol. 33. P. 759–763. DOI: https://doi.org/10.5988/jime1966.33.759. (date of access: 02.12.2023).

7. Wang J.-Z., Wu S.-H., Ji Q.-Z. Heat balance calculation of a turbo-charged marine boiler. 2006. P. 470–472. (date of access: 17.12.2023).

8. Behrendt C., Szczepanek M. Effect of Waste Heat Utilization on the Efficiency of Marine Main Boilers. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 9203. DOI: https://doi.org/10.3390/en15239203. (date of access: 12.12.2023).

REFERENCES

1. Jiang, D., Yu, H., Wang, Z., et al. (2022). Influence of exhaust temperature and flow velocity of marine diesel engines on exhaust gas boiler heat transfer performance. *Sustainability*, 15, 753. https://doi.org/10.3390/su15010753

2. Men, Y., Liu, X., & Zhang, T. (2022). Performance research and application of the vapor pump boiler equipped with flue gas recirculation system. *Energy Conversion and Management*, 254, 115201. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115201

3. Pal, J., Sapali, S., Anil, T. R., et al. (2022). Exergy criteria of performance of waste heat recovery applied for marine auxiliary boiler. *International Journal of Heat and Technology*, 40, 297–303. https://doi.org/10.18280/ijht.400135

4. Behrendt, C. (2019). Development of main marine boilers' structures. In GEOLINKS2019 (B1/VI/13).

5. Behrendt, C., Jasiewicz, R., Szczepanek, M., & Szmukała, M. (2021). Combustion of petroleum waste in the marine boilers – Waste preparation technologies and exhaust emission. *Part 1: Preparation technologies and their influence on waste morphology. Fuel*, 305, 120966. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120966

6. Itami, Y., Nishikawa, E., Kamata, T., et al. (1998). Behavior of Mg hardness in boiler water of marine auxiliary boilers. *Journal of the Marine Engineering Society in Japan*, 33, 759–763. https://doi.org/10.5988/jime1966.33.759

7. Wang, J.-Z., Wu, S.-H., & Ji, Q.-Z. (2006). Heat balance calculation of a turbo-charged marine boiler (pp. 470-472).

8. Behrendt, C., & Szczepanek, M. (2022). Effect of waste heat utilization on the efficiency of marine main boilers. *Energies*, 15, 9203. https://doi.org/10.3390/en15239203

Voichenko T.O., Himpel R.M., Shevchenko A.P., Mannapova O.V.

MODELLING AND STUDYING THE EFFECT OF DEPOSITS ON THE CONDITION OF PIPES OF SHIP BOILER SYSTEMS

The purpose of the article is to carry out modeling and research of the impact of deposits on the condition of pipes to increase the effectiveness of protection against corrosion and the formation of scale on the heating surfaces of ship boilers. The goal is achieved by analyzing the features of scale formation and deposits. It has been established that when using water containing a large amount of minerals, solid sediments, called scale, can form in ship boilers during their operation. This scale has high strength, but has low thermal conductivity, which can lead to technical problems and increased maintenance costs for ship boilers. When calculating the thermal state of pipes, the thermal resistance of deposits is usually considered constant (often zero), not taking into account the fact that at the beginning of operation, the surfaces of the pipes were clean and worked in different conditions than at the end of their service life. Therefore, in order to properly estimate the service life of pipes, it is necessary to take into account the thickness of the layer of deposits and their composition when calculating the thermal state of the pipes. The most significant result is the determination of the dependences of the coefficient of equivalent thermal conductivity on the thickness of the sediment layer on the pipes of ship boiler plants, the difference in temperature of the pipe section of ship boiler plants from the coefficient of equivalent thermal conductivity, the difference in temperature across the pipe section of ship boiler plants from the thickness of the sediment layer and the duration of operation of the pipes of ship boiler plants from scale formation intensity. The results of the research can be used to develop methods for monitoring the condition of pipes and planning their replacement, which will increase the efficiency of operation of ship boiler plants. The proposed approach to sediment modeling can be applied to assess the thermal state of not only the pipes of ship boiler plants, but also the pipelines of other systems during their long-term operation period. Modeling and research of the effect of deposits on the condition of pipes of ship boilers is based on the set of mathematical expressions proposed in the article.

Keywords: *ship boiler plant, modelling, deposits, scale, sediment, heating, thermal conductivity, pipe, coefficient, temperature.*

УДК 621.314.222:621.436 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.28

Войченко Т.О., Шевченко А.П., Маннапова О.В., Рященко О.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМКІВ ЗНИЖЕННЯ ВІБРАЦІЇ, ВИКЛИКАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ, НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОВІСНОЇ ВІБРОІЗОЛЯЦІЇ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Метою статті є моделювання одновісної віброізоляції суднового дизель-генератора для дослідження напрямків зниження вібрації, викликаної енергетичним обладнанням, за рахунок підвищення ефективності віброізолюючого кріплення. Поставлена мета досягається шляхом моделювання чисельного інтегрування одновісної опори при параметрах середньої суднової одиниці; шляхів, переміщення і швидкості коливань суднового агрегату; швидкості та робочого об'єму суднового дизель-генератора, який установлений на чотирьох опорах. Встановлено, що основною причиною вібрації на судні є нерівномірність робочого процесу та дисбаланс поступальних мас механізму силової установки. Сучасні методи розрахунку динаміки дозволили встановити, що причиною збільшеної вібрації у багатоциліндрових дизелів є моменти сил та інерції шатунів. При аналізі конструкції віброзахисних опор енергетичного обладнання виявлені відповідні недоліки. Аналітичний огляд останніх досліджень і публікацій показав особливості багатьох використовуваних наразі методів віброізоляції. Проте відома література не містить інформації про те, як вирішити проблеми зі зниженням вібрації, яка виникає внаслідок енергетичного обладнання, шляхом моделювання та застосування одновісної віброізоляції для суднового дизель-генератора. Найбільш суттєвим надбанням є отримані графічні представлення результатів комплексного моделювання одновісної віброізоляції суднового дизель-генератора, яке представлено у статті. Згідно з результатами моделювання віброізоляції дизель-генератора, можливе використання ефективної опорної сили, що базується на сухому терті. Застосування вагового компенсатора дозволяє уникнути резонансних режимів та забезпечує постійне зусилля, що дорівнює вазі обладнання. Це допомагає запобігти передачі вібрацій силового обладнання на фундамент судна.

Ключові слова: *вібрація, судно, енергетичне обладнання, моделювання, силова установка, одновісна віброізоляція, коливання, кріплення.*

Постановка проблеми. Основною причиною вібрації на судні є нерівномірність робочого процесу та дисбаланс поступальних мас механізму силової установки. Сучасні методи розрахунку динаміки дозволили встановити, що причиною збільшеної вібрації у багатоциліндрових дизелів є моменти сил та інерції шатунів. При аналізі конструкції віброзахисних опор енергетичного обладнання виявлено наступні недоліки:

1. Гумові та гумометалеві опори мають високу щільність гуми, що не дозволяє створювати акустичний опір, тому вібрація може передаватися на фундаментну полицю, навіть якщо вона зміцнена до 25 мм. У процесі роботи гумова решітка старіє та втрачає еластичність в кілька разів. Гумометалеві опори неефективні на частотах менше 32 Гц та мають високу частоту власних коливань, тому не можуть забезпечити безпеку експлуатації морських енергетичних установок.

2. Металеві опори виготовляються у формі гвинтових пружин, які є найбільш енергоємними завдяки роботі матеріалу котушки на зсув. Гвинтові пружини є ефективними на низьких частотах та великій кількості обертів, але недостатньо стабільні. Цей недолік можна усунути, збільшивши діаметр котушки, але це призводить до значного збільшення маси

пружини. Масивні пружини є хорошими хвилеводами, які передають високочастотну вібрацію на основу та знижують коефіцієнт корисної дії.

3. Використання пневматичних опор не є достатньо ефективним для захисту від високочастотних перешкод та швидкої перебудови. Цей тип опор складний у виготовленні та експлуатації, не забезпечує поперечний віброзахист від просторових коливань енергетичного обладнання, та має низьку стійкість та значне статичне осідання.

4. Активні системи є більш складними та дорогими, та більш схильними до втрати стійкості при підвищенні статичної жорсткості. Чистий метод нульової жорсткості не має рішень щодо перебудови опор під нове навантаження, що значно знижує ефективність цього методу. А системи сухого тертя не допускають безперервних зусиль протягом тривалих періодів використання.

Аналітичний огляд показав недоліки багатьох використовуваних наразі методів віброізоляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розроблена активна система віброізоляції плавучого плоту. Чотири гідроприводи з вісімнадцятьма пасивними пружними ізоляторами БЕ-400 були розміщені паралельно між плавучим плотом і конструкцією корпусу. На основі алгоритму LMS з x-фільтрацією і моделюванням вторинного шляху в автономному режимі експериментально застосована адаптивна стратегія управління з прямим зв'язком з чотирма входами і чотирма виходами, в якій кожен виконавчий механізм діяв незалежно, повертаючи назад абсолютне прискорення поблизу місця своєї установки. Експериментальні результати показали, що рівень вібрації датчиків похибки положення на гнучкій конструкції корпусу може бути значно знижено, зниження вібрації становить від 7 дБ до 46 дБ на частотах збудження, а загальне зниження вібрації становить 3-8 дБ в діапазоні 0-400 Гц, що отримано для багатоканальних систем управління.

У роботі [2] описано установку активної двоступеневої віброізоляції дизельного двигуна, в якій для створення вторинних джерел вібрації використовуються чотири сервогідравлічні приводи. Верхня частина бурової установки складається з суднового дизеля та електричного вихрострумового динамометра. Для ізоляції передачі вібрації двигуна через чотири ізолюючі опори були використані два методи управління, засновані на адаптивному багатоступеневому алгоритмі фільтрації: система з одним входом та одним виходом та децентралізована система управління з чотирма входами і виходами. Результати експериментів показали, що в ефективному діапазоні фазової компенсації вторинного шляху було досягнуто хорошого загасання, але в області більш високих частот відбувалося збільшення прискорення, що спричинене нелінійностями, викликаними гідравлічною системою. Це збільшення може призвести до більш високого загального рівня вібрації, ніж при неконтрольованій вібрації. Дослідження показує, що вдосконалений метод, який включає попередній компенсатор та цифровий компенсатор, комутовані послідовно з адаптивним багатосмуговим фільтром, ефективно послаблює небажані вібрації.

У статті [3] досліджувалося встановлення динамічних характеристик новоствореної механічної системи ізоляції низькочастотних коливань. Багато метрологічних приладів дуже чутливі до механічних коливань та низькочастотного акустичного шуму, які можуть виникати як ззовні, так і всередині будівлі, наприклад від вітру, опалення, вентиляції, обладнання кондиціонування повітря, рухомого транспорту та інших джерел. У статті описано теоретичні та експериментальні дослідження. Отримані динамічні характеристики, такі як коефіцієнти пропускної здатності пасивної механічної системи низькочастотної віброізоляції, показали, що ця система може ефективно ізолювати низькочастотні коливання.

У роботі [4] були досліджені характеристики вібропередачі триступеневої нелінійної системи ізоляції плавучих плотів з метою вивчення впливу магнітореологічного демпфера на загасання первинного резонансу. Для цього було використано переглянуту модель для опису нелінійної магнітореологічної демпфуючої сили, яка була експериментально випробувана. Отримана енергія, що розсіюється, була більшою, ніж у звичайного в'язкого демпфера. За допомогою методу усереднення було отримано наближено-аналітичне рішення первинного

резонансу системи ізоляції плавучого плоту і порівняно з числовим інтеграційним рішенням. Було запропоновано передачу сили для оцінки ефективності магніореологічного демпфера. Досліджено також вплив параметрів магніореологічного демпфера на перенесення сили. Результати показали, що передача сили зменшується зі збільшенням в'язкого коефіцієнта демпфірування магніореологічного демпфера і нульової швидкості сили. Керуюча сила має такий же ефект на першу і третю резонансні частоти, але на другу надає протилежний ефект.

У дослідженні [5] активної віброізоляції дизельного двигуна був використаний алгоритм адаптивної гребінчастої фільтрації. Спочатку було проведено теоретичний аналіз адаптивного алгоритму, після чого була розроблена стратегія управління та система управління. Наступним етапом було моделювання та проведення експериментів. Відповідно до характеристик дизельного двигуна, був введений модифікований гребінчастий алгоритм фільтрації з розширенням для підвищення адаптивності алгоритму управління та підсилення ефекту віброізоляції. Після цього були проведені експерименти, результати яких показали, що така стратегія є ефективною для зниження вібропередачі дизельного двигуна.

У статті [6] досліджено систему активної віброізоляції на прикладі дизель-генераторної установки, що монтується на буксирі, з метою оцінки ефективності такої системи в реальних умовах. Система складається з шести користувацьких інерційних приводів, що добре підходять для встановлення на існуюче обладнання, і контролера. Шість акселерометрів встановлені на верхній частині шести ізоляторів для вимірювання похибки, тоді як ще шість акселерометрів встановлені під ізоляторами для вимірювання глобальної вібрації корабля під генераторною установкою. Гідрофон також розміщується в воді для вимірювання підводного шуму, що виникає через генератор. Використана стратегія управління є децентралізованою адаптивною системою з прямим зв'язком між шістьма входами та шістьма виходами, при цьому опорний сигнал отримується з оптичного тахометра на валу між двигуном і генератором. Щоб пригнічити вібрацію на всіх домінуючих частотах впливу, електричний ланцюг генерує команди напівдвигуна, необхідні для відповідного відгуку на вимірювання опорного сигналу. Експерименти показали, що поєднання активної системи управління і пасивних ізоляторів ефективно зменшує загальну вібрацію і акустичний тиск в місці розташування гідрофону.

У роботі [7] зазначено, що рівні звуку та вібрації, які створюються двигуном на суднах, часто є надто високими, що негативно впливає на екіпаж, пасажирів та навколишнє середовище. Звичайні класичні пасивні процедури нівелювання такого впливу менш ефективні через низькочастотний вміст та викликають значне зростання ваги. Тому необхідно знайти більш ефективні методи гасіння вібрації, які можуть бути досягнуті, наприклад, за допомогою активних кріплень двигуна, що дозволить знизити вібрацію, навіть якщо корпус не є дуже жорстким. У дослідженні аналізуються проблеми звуку та вібрації на судні з точки зору системи контролю активного шуму та вібрації, встановлені основні джерела шуму та вібрації і способи передачі шуму. Були розроблені та оптимізовані пасивні підвіски двигуна з жорсткістю, адаптовані до рухливості та рівня вібрації двигуна. Пропонується використання вузькосмугового управління з прямим зв'язком гармонік двигуна та гвинта для оцінки характеристик потенційної активної системи управління.

Разом з тим, у відомій літературі немає інформації про те, як вирішити проблеми, пов'язані зі зниженням вібрації, викликаної енергетичним обладнанням, на основі моделювання і одновісної віброізоляції суднового дизель-генератора.

Мета дослідження – моделювання одновісної віброізоляції суднового дизель-генератора для дослідження напрямків зниження вібрації, викликаної енергетичним обладнанням, за рахунок підвищення ефективності віброізолюючого кріплення.

Основні результати дослідження. Математична модель опори містить рівняння другого порядку у вигляді Ньютона

$$\frac{d^2q}{dt^2}m = f\cos(wt) - G + F(q) - b\frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

де $\frac{d^2q}{dt^2}$ – прискорення маси;

m – маса;
f – амплітуда коерцитивної сили;
w – кутова частота коерцитивної сили;
t – час;
G – вага;
$F(q)$ – сила вагового компенсатора;
b – коефіцієнт в'язкості демпфера;
$\frac{dq}{dt}$ – масова швидкість.

Сила тяжіння, сила компенсатора ваги, сили форсування та моменти від робочого процесу є причинами прискорення масивного джерела вібрації. Гармонійна сила з частотою спалахів у циліндрах може змінювати останню з цих сил і моментів.

Рівняння руху є другим інтегралом рівняння динаміки. Третій інтеграл вказує на пройдену відстань. Оскільки в опорі відсутня пружина, жорсткість і частота власних коливань дорівнюють нулю.

При моделюванні віброізоляції на основі пружних елементів можна не враховувати вагу джерела вібрації, оскільки вона завжди врівноважується деформацією лінійного пружного елемента. Навіть використання нелінійних пружних елементів не впливає на методику, оскільки коливання мають невелику амплітуду, а жорсткість опори можна вважати постійною всередині цього діапазону, як це зазначено в довідниках.

Для підтримки нульової жорсткості, необхідний облік ваги, оскільки він компенсується силою тертя, що діє на робочій поверхні компенсатора, і ця сила не є відновлювальною, що відповідає стану невагомості. Для сучасних електростанцій амплітуда швидкості коливань набагато менше 0,02 м/с, що дозволяє прийняти швидкість ковзання за цю ж величину. Загалом, для агрегату потужність можна визначити як добуток швидкості та ваги, що дорівнює 0,2 Вт/кг. При моделюванні компенсатора ваги ми будемо враховувати саме цю величину.

Синтез одноосьовий опори містить всі особливості реальної просторової системи віброізоляції, але структура набагато простіше. Розглянемо масу m, на яку впливає гармонійна сила f, вага G, в'язка сила b, сила компенсатора ваги $F(q)$. Модель чисельного інтегрування одновісної опори при параметрах середньої суднової одиниці має вигляд

$$D(t,q) := \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \frac{1}{m}(f\cos(wt) - G + F(q) - bq_2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

де, наприклад, для подальшого моделювання приймемо, що $F(q) := if(q_2 < v, G, 0)$; $v := 2$; $f := 100$; $m := 1000$; $w := 314$; $b := 1000$; $G := 9.81m$; $init_{vals} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $init_t := 0$, $final_t := 0$, $N_{steps} := 10000$.

Пропонується фізична модель, яка використовує фрикційну муфту як компенсатор у режимі гальмування. Швидкість у місці фрикційного контакту більша, ніж амплітуда швидкості коливань, і вивчається передача вібрації на корпус корабля та ефективність такої опори при параметрах середньої суднової одиниці. Для покращення результатів моделювання в чисельну модель було введено демпфірування, яке відповідає структурному тертю і зменшує перехідний процес (рис. 1). На основі результатів чисельного інтегрування будуть побудовані осцилограми першого, другого і третього інтегралів.

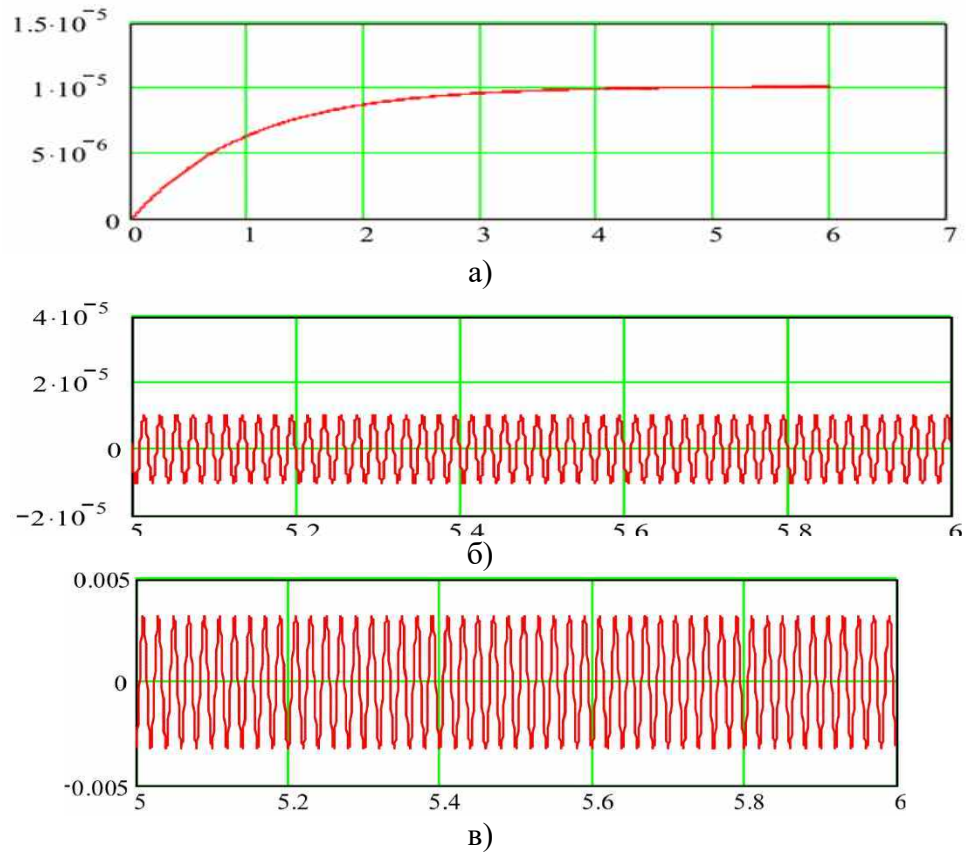


Рисунок 1 – Шлях, переміщення і швидкість коливань суднового агрегату

Рис. 1 в) показує швидкість коливань обладнання під час руху з п'ятої до шостої секунди процесу, яка не перевищує 0,003 м/с. Середній графік показує переміщення обладнання за той же період часу, яке підтверджує, що відхилення центру мас не перевищує 0,00001 метра. Всі ці значення знаходяться в межах допустимих значень.

Ефективність системи визначалася за допомогою різниці між силою, що діє на масу, та примусовою силою. Наприклад, при зміні знаку на гармонійну силу, було виділено фрагмент графіка під час максимальної сили (рис. 2).

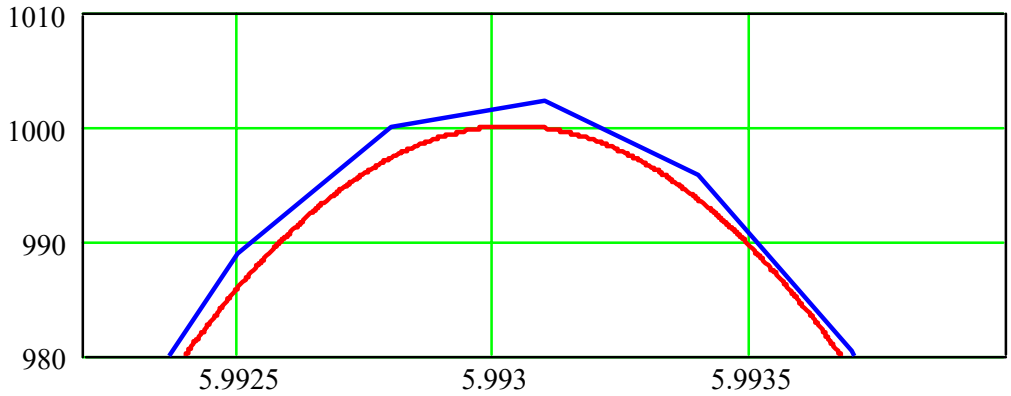


Рисунок 2 – Порівняння сили інерції (синя лінія) і необхідної сили (червона лінія)

З рис. 2 видно, що різниця амплітуд не перевищує $\Delta \approx 5$ Н, отже, на основу передається менше п'яти ньютонів. Коефіцієнт динамічності або коефіцієнт віброізоляції відповідає значенню

$$\beta = \frac{\Delta}{f} = \frac{5}{1000} = 0.005, \quad (3)$$

де Δ – різниця амплітуд;

f – сила примусу.

Якщо параметри однакові, то лінійна опора повинна забезпечувати статичне осідання не менше 20 мм. Однак, стандартні віброізолятори різних типів не можуть гарантувати такого співвідношення між осіданням і масою встановленого обладнання.

Розглянемо базову в'язко-пружну систему як контрольний експеримент з частотою ω = 314 рад/с, масою обладнання m = 1000 кг, силою нагнітання f = 1000 Н і жорсткістю традиційних віброізоляторів рівною 5 МН/м на опору і 20 МН/м на чотири опори (рис. 3).

На рис. 3, що відображає швидкість з дев'ятої до десятої секунди процесу, амплітуда вібраційної швидкості складає 0,01 м/с, що становить половину швидкості ковзання в компенсаторі. Водотоннажність знаходиться в межах 0,0002 м. Згідно з теорією коливань, коефіцієнт динамічності безфрикційної системи для наведених параметрів дорівнює

$$\beta = \frac{1}{1-\frac{w^2}{c}m} = 0.254. \quad (4)$$

Таким чином, коефіцієнт ефективності становить $\frac{0.254}{0.005} = 50$. Тому традиційна підвіска передає змінні сили на фундамент корабля в 50 разів більше. Щодо прикладу побудови амплітудно-частотної характеристики в'язкопружної системи, то на ній можна спостерігати резонансний пік.

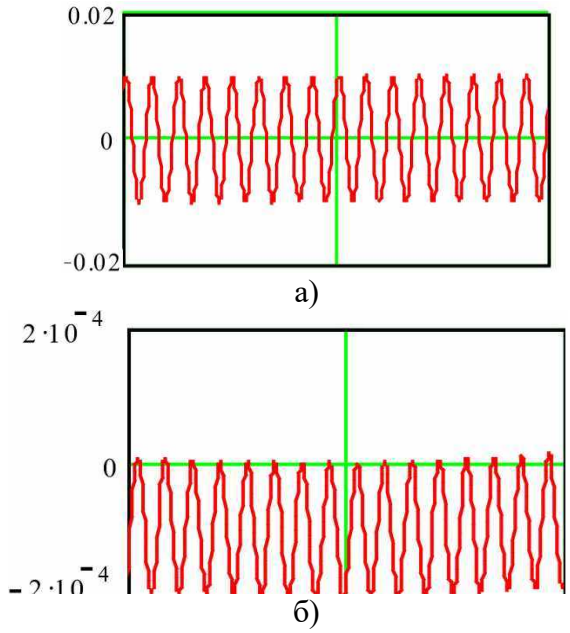


Рисунок 3 – На графіку а) представлена швидкість, а на б) – робочий об'єм, суднового дизель-генератора вагою 1000 кг, який установлений на чотирьох опорах

Частотне сканування вибирається таким чином, щоб забезпечити загасання коливань після проходження резонансної області. Рівень демпфірування визначається на основі результатів натурних досліджень коливань суднового допоміжного двигуна при ударі. За осцилограмою відбувається логарифмічне зниження загасання, з якого отримується коефіцієнт демпфірування віброізолюючого кріплення (рис. 4).

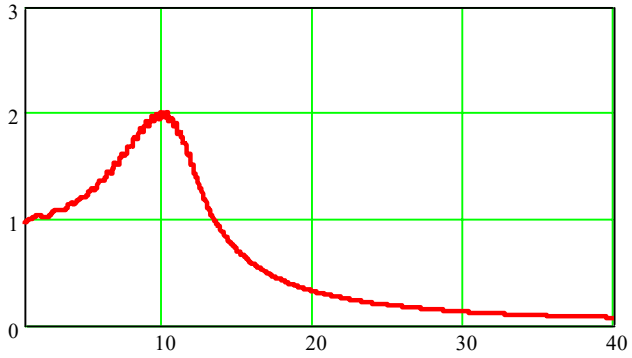


Рисунок 4 – Амплітудно-частотна характеристика (частотна характеристика) пружної опори:
по горизонталі – ряд часових значень;
по вертикалі – амплітуда коливань

У коливальній системі без тертя, вектори прискорення, швидкості та зміщення завжди перпендикулярні один одному. Це може бути використано для створення частотної характеристики. Наприклад, поділ швидкості коливань на кутову швидкість дає амплітуду, яку можна обчислити за допомогою теореми Піфагора. Також можна розділити прискорення на квадрат кутової швидкості, щоб отримати амплітуду коливань. Змінюючи частоту форсуючої сили, можна отримати частотну характеристику процесу. Проте, важливо зазначити, що результат від дії коерцитивної сили не дорівнює такому при постійній частоті, тому необхідно виконувати частотний інтеграл для отримання правильного результату. Лінійна зміна може дорівнювати половині значення струму.

Висновки. Проведене моделювання віброізоляції дизель-генератора показало, що можлива ефективна опорна сила на основі сухого тертя. Застосування вагового компенсатора дозволяє уникнути резонансних режимів та забезпечує стале зусилля, що дорівнює вазі обладнання. Це дозволяє уникнути передачі вібрацій силового обладнання на фундамент судна. Порівняння з пружним захистом від вібрацій на основі опор показало, що ваговий компенсатор на 50 разів ефективніший завдяки відсутності жорсткості в силах тертя. Дослідження також показало, що потужність сили тертя залежить від швидкості коливань опорної поверхні енергетичного обладнання та амплітуди вібраційної швидкості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhou L.-B, Yang T.-J, Zhang P, Pan J.-J, Liu Z.-G. Tests for an active floating raft vibration isolation system based on a flexible hull structure. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 2013. Vol. 32. P. 145-149+193.

2. Yang T.J, Suai Z.J, Sun Yao et al. Active vibration isolation system for a diesel engine. *Noise Control Engineering Journal*. 2012. Vol. 60. P. 267-282. DOI: https://doi.org/10.3397/1.3701004. (date of access: 10.12.2023).

3. Jurevicius M, Vekteris V, Viselga G, Turla V, Kilikevičius A, Iljin I. Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019. Vol. 38. DOI: https://doi.org/10.1177/1461348419830295. (date of access: 09.12.2023).

4. Fang Yuanyuan, Zuo Yanyan, Xia Zhaowang. Vibration transmission analysis of nonlinear floating raft isolation system with magneto-rheological damper. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2018. Vol. 37. DOI: https://doi.org/10.1177/1461348418756027. (date of access: 21.12.2023).

5. Zhu M, Yang T, Shuai Z, Liu Z. Investigation of active vibration isolation based on an adaptive comb-shaped filtered algorithm. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University*. 2011. Vol. 32. P. 1576-1581. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-

7043.2011.12.009. (date of access: 20.12.2023).

6. Wu L, Li X, Zhu M, Brennan M, Liu Z. Active Vibration Isolation of a Diesel Generator in a Small Marine Vessel: An Experimental Study. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 3025. DOI: https://doi.org/10.3390/app10093025. (date of access: 12.12.2023).

7. Winberg M, Johansson S, Håkansson L. et al. Active Vibration Isolation in Ships: A Pre-Analysis of Sound and Vibration Problems. *International Journal of Acoustics and Vibrations*. 2005. Vol. 10. P. 175-196. DOI: https://doi.org/10.20855/ijav.2005.10.4186. (date of access: 04.12.2023).

REFERENCES

1. Zhou, L.-B., Yang, T.-J., Zhang, P., Pan, J.-J, & Liu, Z.-G. (2013). Tests for an active floating raft vibration isolation system based on a flexible hull structure. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*, 32, 145-149+193.

2. Yang, T.J., Suai, Z.J., Sun, Yao, Zhu, M.G., Xiao, Y.H., Liu, X.G., Du, J.T., Jin, Guoyong & Liu, Z.G. (2012). Active vibration isolation system for a diesel engine. *Noise Control Engineering Journal*, 60, 267-282. https://doi.org/10.3397/1.3701004

3. Jurevicius, M., Vekteris, V., Viselga, Gintas, Turla, Vytautas, Kilikevičius, Artūras & Iljin, Igor. (2019). Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38, 146134841983029. https://doi.org/10.1177/1461348419830295

4. Fang, Yuanyuan, Zuo, Yanyan & Xia, Zhaowang. (2018). Vibration transmission analysis of nonlinear floating raft isolation system with magneto-rheological damper. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37, 146134841875602. https://doi.org/10.1177/1461348419830295

5. Zhu, M. & Yang, T., Shuai, Z. & Liu, Z. (2011). Investigation of active vibration isolation based on an adaptive comb-shaped filtered algorithm. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University*, 32, 1576-1581. https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7043.2011.12.009

6. Wu, Lei, Li, Xinhui, Zhu, Minggang, Brennan, Michael & Liu, Zhigang. (2020). Active Vibration Isolation of a Diesel Generator in a Small Marine Vessel: An Experimental Study. *Applied Sciences*, 10, 3025. https://doi.org/10.3390/app10093025

7. Winberg, Mathias, Johansson, Sven, Håkansson, Lars, Claesson, I. & Lagö, T. (2005). Active Vibration Isolation in Ships: A Pre-Analysis of Sound and Vibration Problems. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 10, 175-196. https://doi.org/10.20855/ijav.2005.10.4186

Voichenko T.O., Shevchenko A.P., Mannapova O.V., Riashchenko O.I.

STUDYING THE DIRECTIONS OF VIBRATION REDUCTION CAUSED BY POWER EQUIPMENT BASED ON MODELLING THE UNIAXIAL VIBRATION ISOLATION OF A SHIP'S DIESEL GENERATOR

The aim of the article is to model the uniaxial vibration isolation of a ship's diesel generator to study the directions of vibration reduction caused by power equipment by increasing the efficiency of vibration isolation mounts. This goal is achieved by simulating the numerical integration of a single-axis support with the parameters of the average ship unit; the paths, movement and speed of oscillations of the ship's unit; the speed and working volume of the ship's diesel generator, which is installed on four supports. It is established that the main cause of vibration on a ship is the unevenness of the working process and the imbalance of translational masses of the propulsion system. Modern methods of calculating dynamics have made it possible to establish that the cause of increased vibration in multi-cylinder diesel engines is the moments of force and inertia of the connecting rods. When analysing the design of vibration protection supports for power equipment, the corresponding shortcomings were identified. An analytical review of recent research and publications has shown the features of many currently used vibration isolation methods. However, the known literature does not

contain information on how to solve the problems of reducing vibration caused by power equipment by modelling and applying uniaxial vibration isolation for a ship's diesel generator. The most significant achievement is the graphical representation of the results of complex modelling of uniaxial vibration isolation of a ship's diesel generator, which is presented in the article. According to the results of modelling the vibration isolation of a diesel generator, it is possible to use an effective supporting force based on dry friction. The use of a weight compensator avoids resonance modes and provides a constant force equal to the weight of the equipment. This helps prevent the transmission of power equipment vibrations to the ship's foundation.

Keywords: *vibration, vessel, power equipment, modelling, power plant, uniaxial vibration isolation, oscillations, fastening.*

УДК 629.123 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.29

Дудченко С.В.

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАВІГАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ГАРАНТОВАНОЇ СМУГИ ПРОВОДКИ ТА ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДЕН

Анотація *Систематичний процес планування забезпечує розробку детального і відповідного плану переходу, що дозволяє судноводію завчасно реагувати на критичні ситуації та важливі зони у процесі руху судна. Процес оцінки полягає у зборі, обробці та аналізі всієї інформації про навігаційну обстановку. Даний процес дозволяє судноводію чітко і точно визначати й окреслювати всі зони, в яких можуть виникнути небезпечні ситуації. Навігаційна обстановка характеризується високою інтенсивністю територіальної активності (вантажні та пасажирські перевезення, видобуток корисних копалин, дослідження, оборонна діяльність, рибний промисел, тощо), множиною навігаційних небезпек (дно має складний рельєф, малі глибини, лід, течії, вплив суші) та мінливістю гідрометеорологічних умов. На ходовому містку для відображення та аналізу територіальної ситуації використовуються різні геоінформаційні засоби. Особливістю суднових геоінформаційних систем є їхня орієнтація на вирішення широкого кола задач. Проте, для реалізації цілісного та систематичного підходу щодо реалізації концепції e-Navigation. Необхідно виконувати гармонізований збір, інтеграцію, обмін, подання та аналіз навігаційної інформації між судном та береговими службами за допомогою електронних засобів. Тому доцільно розглянути можливість створення апарату формалізації навігаційної обстановки, що дозволяє однозначно розділити інформацію та механізми її обробки у процесі моделювання. В роботі удосконалено математичну модель навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден, основу якої, на відміну від відомих, складає формалізм дискретних дієвих систем з елементами нечіткого логічного виведення, що дозволяє підвищити оперативність і точність моделювання складної навігаційної обстановки з великою кількістю навігаційних небезпек.*

Ключові слова: *voyage planning, e-Voyage, e-Navigation, навігаційна обстановка, маршрут переходу, смуга проводки.*

Постановка проблеми. Інтенсифікація судноплавства на світових морських шляхах робить актуальним розвиток інтелектуальних сервісів, спрямованих на підвищення ефективності морських перевезень і зниження ризиків експлуатації суден. Одним з найбільш

важливих завдань у цій сфері є вироблення відповідних рішень для автоматичного корегування (зміни) плану переходу судна в динамічних умовах зміни навігаційної обстановки. Важливою особливістю вирішення даного завдання врахування того, що робота судноводія протікає в режимі реального часу, що накладає жорсткі часові обмеження на процеси вироблення та прийняття рішень і вимагає побудови сценаріїв запобігання ситуацій, що можуть знизити рівень безпеки переходу. Зазначені обставини зумовлюють необхідність розробки адекватних до вимог МППЗС-72 математичних моделей, придатних, для опису ситуацій, що склалася в даний момент та прийняття рішень з управління судном у реальному часі, в умовах динамічної навігаційної обстановки.

Аналіз сучасних підходів щодо побудови математичних моделей навігаційної обстановки [1] для планування маршруту судна показує, що в них є недоліки, що полягають:

1) невизначеність співвідношення району плавання та гарантованого маршруту судна;

2) суб'єктивний характер цільової функції переходу;

3) можливий пропуск навігаційних небезпек при неповному аналізі району плавання;

4) можливе перекриття зон навігаційної безпеки руху судна побудованих навколо зон навігаційних небезпек, що закриває доступні проходи між ними;

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

Дані недолік характеризують відсутність комплексності врахування всіх в існуючих математичних моделях навігаційної обстановки що застосовуються для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден

Основна складність практичної реалізації полягає в тому, що комплексне рішення задачі планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу вимагає відповідності математичної моделі навігаційної обстановки до реальних умов змінюваного навколишнього середовища та об’єктів. Тому вирішення завдання планування маршруту повинна включати:

• геоінформаційний елемент — моделі моніторингу та прогнозування динаміки зміни навігаційної обстановки в районі плавання протягом всього часу його проходження;

• технологічний компонент — модель руху судна, яка враховує експлуатаційні можливості судна;

• економічна складова — критерії та обмеження вирішуваного завдання, які виражені в універсальних виразах;

Математична модель навігаційної обстановки повинна задовольняти наступним вимогам:

- рух суден в районі плавання поточної навігаційної обстановки розглядається як цілеспрямована дія, метою якої є запобігання зіткненню з навігаційними перешкодами, при цьому керуючись вимогами МППЗС-72;

- прогнозування процесу розвитку навігаційної обстановки необхідно виконувати на основі сценарного підходу, враховуючи динамічні моделі руху суден;

- реальний процес переходу судна проходить в умовах складної групової взаємодії;

- кількість можливих сценаріїв розвитку навігаційної обстановки, необхідно скоротити, виходячи з обмежень МППЗС-72, так і з динаміки змін ключових параметрів руху суден (ліній відносного руху, пеленгів та швидкостей).

Враховуючи те, що процес зміни навігаційної обстановки є динамічним і безперервним в часі, на модель застосовуються такі припущення:

- зміна стану навігаційної обстановки впливає на об'єкти, що моделюються;

- опис руху кожного судна з використанням системи диференціальних рівнянь є складним через суттєву кількість об'єктів моделювання;

- облік гідродинамічних факторів, що характеризують стан моделі судна у кожний момент часу не є необхідним у рамках вирішення поставленого завдання;

- зміна ситуацій навігаційної обстановки носить стохастичний характер;

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню наукового завдання автоматичного планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден присвячено значну кількість досліджень. В загальному виділяють три напрямки: автоматичне планування маршруту, відстеження маршруту та уникнення зіткнень [2]. Планування маршруту передбачає розробку глобального шляху переходу в якому визначаються основні статичні перешкоди (земна поверхня, рифи та ін.). В роботі [3] віддано перевагу розробці маршруту планування на основі точок шляху та запропоновано ефективний контролер для спрямування суден під час навігації. Оскільки судно має велику інерцію, що важко контролювати, для руху по довільних кривих, коли їх швидкість не змінюється. Тому розглядати лише кінематичні обмеження для планування маршруту не в повній мірі відповідає вимогам щодо планування маршруту. У роботах [4, 5] розглядається глобальне та локальне планування траєкторії судна як об'єкта керування. Рекомендований маршрут переходу даних суден зазвичай виражається набором точок. Ця модель представлення маршруту переходу є розповсюдженою в морській практиці. В роботах [6, 7] запропоновано планувати маршрут під час переходу, враховуючи такі фактори, як погодні умови, уникнення перешкод та ін. Для реалізації алгоритмів даних алгоритмів, необхідно виконати пошук та вибір маршруту для суден серед альтернативних маршрутів, визначених у просторі карти. Першим кроком є визначення всіх альтернативних маршрутів, через які судно безпечно розходиться з навігаційними небезпеками на просторі карти. Реалізація даного підходу за рахунок методів клітинної декомпозиції та дорожньої карти реалізовано в робах [8, 9].

В роботі [10] запропоновано модель для створення маршруту, для зменшення витрат палива або часу навігації за допомогою генетичного алгоритму. В роботі [11] використано модель для реалізації алгоритму Дейкстри. Крім того, в [12] показано модель побудови маршруту, використовуючи дані про погоду, відповідно до керівних принципів ІМО з планування навігації [13]. У цьому дослідженні розглянуто створення гарантованих маршрутів для забезпечення безпеки від перешкод у складних прибережних водах. В статті [14] прийнято модель подання квадратного дерева для аналізу змін у великих морських середовищах для підвищення ефективності обчислень. Алгоритм A* використовувався для пошуку шляху, та запропоновано нову евристичну функцію. У роботі [15] побудувано діаграму Вороного на узбережжі Сінгапуру, з використаннням графіків видимості. Це дозволяє видалити непотрібні точки з маршруту, розрахованого за діаграмою Вороного.

У дослідженні [16] запропоновано метод генерації шляху, який поєднує квадро-дерева та графіки видимості в прибережних водах і встановлює відстань від перешкод з урахуванням інформації про глибину води. Для визначення перешкод у просторі карти та створення маршруту в роботі [17] запропоновано модель перешкод на основі супутникових зображень. У статті [18] створено маршрути розходження з перешкодами за допомогою моделі обробки зображень на основі зображення землі для проведення рятувальних робіт з використанням човнів у затопленому середовищі.

Проте, в наведених роботах не в повній мірі розкриті питання побудови математичних моделей навігаційної обстановки для планування гарантованої смуги проводки та планування оптимального маршруту переходу суден.

Мета дослідження є підвищення обґрунтованості оцінки навігаційної обстановки та вироблення рекомендацій в системі e-Voyage в процесі планування маршруту переходу судна.

Основні результати дослідження.

Математична модель навігаційної обстановки застосовується на третьому та четвертому етапі планування [19], а саме виконання та моніторинг. Враховуючи це можна зробити припущення, що для забезпечення безпеки руху судна, необхідно визначити ситуацію, що складається при даних значення навігаційної обстановки. В загальному вигляді навігаційну обстановку в районі плавання в заданий момент часу $E^{nav}(t)$ можна задати приналежністю до певної навігаційної ситуації з множини S^{nav}:

$$E^{nav}(t) \in s_i^{nav}, де\ s_i^{nav} \in S^{nav}. \quad (1$$

При виборі маршруту в процесі планування з множини допустимих маршрутів вибирається той, для якого досягаються найкращі значення показники наступних критеріїв якості:

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

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

$$S^{nav} = \left\{ s_1^{nav}, s_2^{nav}, s_3^{nav}, s_4^{nav}, s_5^{nav}, s_6^{nav}, s_7^{nav} \right\} \quad (2)$$

де s_1^{nav} – ситуація штатна;

s_2^{nav} – ситуація екстремальна;

s_3^{nav} – ситуація позаштатна;

s_4^{nav} – ситуація небезпечного зближення;

s_5^{nav} – ситуація зіткнення;

s_6^{nav} – ситуація аварійна;

s_7^{nav} – ситуація катастрофічна;

Запропонована множина поділу ситуацій відповідно до умов навігаційної обстановки в даний момент часу може розглядатися як інструмент підвищення достовірності вироблення сигналів небезпеки, подолання невизначеності, пов'язаних із множинністю можливих управлінських рішень, правил МППЗС- 72 (інших регламентуючих документів) та вирішення проблеми генерації хибної тривоги. Також, може використовуватися як джерело вхідних даних для вироблення можливих управлінських рішень в автоматизованих інформаційних системах (AIS, ECDIS) та системах управління рухом судна (СУРС).

Модель навігаційної обстановки є базовою моделлю при розробці маршруту в процесі планування переходу. Тобто модель повинна інкапсулювати як вплив зміни навігаційної обстановки на елементи маршрутизації судна, так і моделі, що необхідні для визначення управлінських впливів судноводія на судно. Стан системи "навігаційна обстановка – судно – судноводій" визначається топологією та характером взаємозв'язку її елементів, звідси поведінка системи зіставляється з ситуаціями виражаними через вплив на показники критеріїв якості маршруту переходу. В загальному перехід від штатної ситуації s_1^{nav} до інших ситуацій $s_i^{nav} \in S^{nav}$ відбувається у разі надходження до системи дискретних подій (погіршення метеоумов, поява навігаційної небезпеки, тощо) у відповідні проміжки часу. Тому в такій постановці систему "навігаційна обстановка – судно – судноводій" можна віднести до систем дискретного часу процес переходу між ситуаціями відбувається через різні за тривалістю проміжки часу, тривалість яких корелюється з впливом зовнішніх факторів навігаційної обстановки, а зміна станів системи виражається у вигляді подій. За допомогою математичного апарату формалізму дискретних дієвих систем (DEVS) [20], описуються системи, побудовані з урахуванням ієрархічної сукупності взаємодіючих об'єктів. На відміну від безперервних систем, взаємодія системи з довкіллям відбувається у вигляді надходження у систему дискретних подій у довільні проміжки часу. Переваги такого формалізму зумовлюються успадкуванням математичного апарату теорії динамічних систем. Зазначений формалізм дозволяє поєднувати

елементи як безперервної, і дискретної парадигм у межах одного об'єкта моделювання. Ще одна перевага полягає у можливості синтезу моделі шляхом комбінування атомарних складових у більш складні об'єкти; у свою чергу, отримані об'єкти можуть брати участь у побудові ще складніших.

В загальному виді математичну модель навігаційної обстановки на основі формалізму дискретних дієвих систем (DEVS) можна описати виразом:

$$E^{nav} = \left(S^{nav}, X^{evnt}, W^{plan}, \delta_{\text{int}}, \delta_{ext}, \lambda, T^{S^{nav}} \right), \tag{3}$$

де S^{nav} – множина дискретних навігаційних ситуації;

X^{evnt} – множина вхідних подій;

W^{plan} – модель запланованого маршруту переходу;

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

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

λ – функція генерації подій;

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

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

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

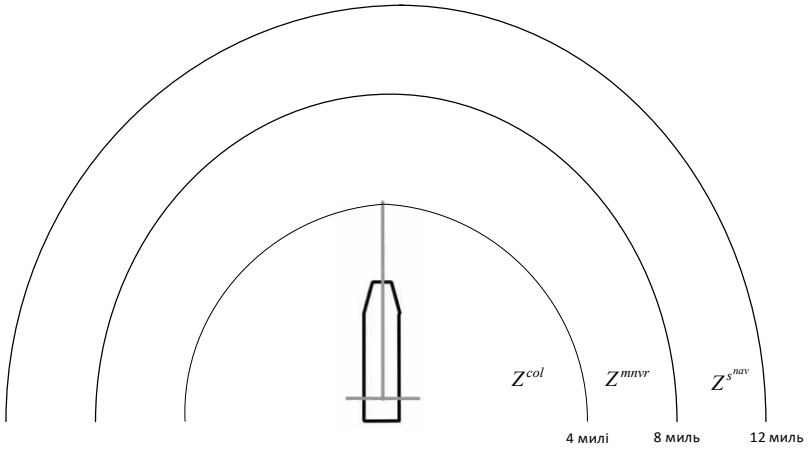


Рисунок 2.5 – Зони, що характеризують процес розходження суден з навігаційними небезпеками

Розглянемо навігаційну ситуацію S^{nav}, що описує навігаційну обстановку $E^{nav}(t)$ у заданій зоні навколо власного судна у певний час t. Нехай S^{nav} характеризується наявністю в зоні оцінки ситуації ($Z^{s^{nav}}$) об'єктів, які представлені:

$$M_i^{obj} = \left\{ x, y, V, \psi, \Delta V, \Delta\psi, Z^{safe} \right\}, \tag{4}$$

де x, y – поточні координати об'єкта;

V – швидкість об'єкта;

ψ – курс об'єкта;

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

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

Кожний *i*-тий об'єкт в момент часу *t* характеризується множиною можливих траєкторій руху по відношенню до власного судна, що можна представити:

$$U_i^{obj} = \left(M_i^{obj}, \Omega_i^{obj} \right), \tag{5}$$

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

$$\Omega_i^{obj} = \left(\omega_1^{obj}, \omega_2^{obj}, \omega_3^{obj}, \omega_4^{obj} \right), \tag{6}$$

- наявні навігаційні обмеження руху в зоні $Z^{s^{nav}}$ – ω_1^{obj};

- вимоги МППЗС-72 – ω_2^{obj};

- вимоги критеріїв безпечного розходження по мінімальній безпечній дистанції зближення, часу зближення, пеленгу або курсового кута ЛОД – ω_3^{obj};

- обмеження, зумовлені кінематичними параметрами руху об'єкту та їх маневрених характеристик – ω_4^{obj}.

Тоді функція генерація події має вид:

$$\lambda = \begin{cases} 2,\ U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x,y) \in Z^{Z^{col}} \\ 1,\ U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x,y) \in Z^{mnvr} \\ 0,\ U_i^{obj} \xrightarrow{T_{pred}} \mu_{M_i^{obj}}(x,y) \notin Z^{mnvr} \end{cases}. \tag{7}$$

Генерація події, виконується коли можлива траєкторія руху об'єкта за встановлений час прогнозу T_{pred} приводить до попадання об'єкта із зони $Z^{s^{nav}}$ в зону Z^{mnvr} та викликає потребує корегування плану W^{plan}. При цьому U_i^{obj} визначається як модель події M^{evnt}.

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

$$s_1^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \in \varnothing \\ \lambda = 0 \\ T^{S^{nav}} = T^{W^{plan}} \\ \delta_{\text{int}} : \tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_1^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_1^{nav} \end{cases}, \quad (8)$$

де $\tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan} y_{11}) \xrightarrow{T_{pred}} s_1^{nav}$ – нечітка імплікація побудована на продукційних правилах, яка визначає зміну ситуацій, у відповідності до відношення моделі руху судна та моделі запланованого маршруту на заданий час прогнозу T_{pred}.

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

$$s_2^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \varnothing \\ \lambda = 1 \\ T^{S^{nav}} = T^{trans} \\ \delta_{ext} : \tilde{A}(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}) \circ R(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}, s_1^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_2^{nav} \\ \delta_{\text{int}} : \tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_2^{nav}) \xrightarrow{T_{trans}} s_1^{nav} \end{cases}, \quad (9)$$

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

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

$$s_3^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \varnothing \\ \lambda = 1 \\ T^{S^{nav}} = T^{trans} \\ \delta_{ext} : \tilde{A}(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}) \circ R(M_i^{evnt}, X_i^{evnt}, s_2^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_3^{nav} \\ \delta_{\text{int}} : \tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_2^{nav}) \overset{T_{trans}}{\not\to} s_1^{nav} \end{cases}, \quad (10)$$

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

$$s_4^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \varnothing \\ \lambda = 2 \\ T^{S^{nav}} \le T^{col} \\ \delta_{ext} : \tilde{A}(M^{evnt}, X^{evnt}) \circ R(M^{evnt}, X^{evnt}, s_3^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_4^{nav} \\ \delta_{\text{int}} : \tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_3^{nav}) \xrightarrow{T_{trans} < T^{col}} s_1^{nav} \ or \ s_2^{nav} \end{cases}, \quad (11)$$

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

$$s_5^{nav} = \begin{cases} X^{evnt} \notin \varnothing \\ \lambda = 2 \\ T^{S^{nav}} > T^{col} \\ \delta_{ext} : \tilde{A}(M^{evnt}, X^{evnt}) \circ R(M^{evnt}, X^{evnt}, s_4^{nav}) \xrightarrow{T_{pred}} s_5^{nav} \\ \delta_{\text{int}} : \tilde{A}(M^{ship}, W^{plan}) \circ R(M^{ship}, W^{plan}, s_5^{nav}) \xrightarrow{T_{trans} > T^{col}} s_6^{nav} \end{cases}. \quad (12)$$

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

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

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

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

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія / В.В. Аулін, А.В. Гриньків, А.О. Головатий та ін. ; під заг. ред. В.В. Ауліна. – Кропивницький, 2020, – 428 с.

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

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

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

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

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

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

8. Szlapczynska J. Multi-objective weather routing with customised criteria and constraints / J. Szlapczynska. – Navig., vol 68., 2015, – 338–354.

9. Sen D. An approach for development of a ship routing algorithm for application in the north Indian ocean region / D. Sen, C.P. Padhy. – Appl. Ocean Res., vol 50, 2015. – pp. 173–191.

10. Vettor R. Development of a ship weather routing system / Vettor R.; Guedes Soares C. – Ocean Eng., 2016, vol 123. – pp. 1-14.

11. IMO. IMO Resolution A. 893(21) Guidelines for Voyage Planning; IMO: London, UK, 1999.

12. Shah B.C. Long-distance path planning for unmanned surface vehicles in complex marine environment / Shah B.C., Gupta, S.K. – J. Ocean. Eng., 2019, vol 45. – pp. 813-830.

13. Niu H.L. Voronoi-visibility roadmap-based path planning algorithm for unmanned Surface vehicles / Niu H.L.; Savvaris A.; Tsourdos A.; Ji Z.J. – Navig., 2019, vol 72. – pp. 850-874.

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

15. Shi B. Obstacles modeling method in cluttered environments using satellite images and its application to path planning for USV / Shi B., Su Y., Zhang H., Liu J., Wan L. – Archit. Ocean Eng., 2018, vol. 11. – pp. 202-210.

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

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

18. Nash A. Any-angle path planning / Nash A., Koenig S. – AI Mag., 2013, vol. 34, no. 4. – pp. 85–107.

19. C. Dyrcz Voyage planning and weather / C. Dyrcz// – Polish Naval Academy.– Gdynia, 2020. 132 p.

20. Sprock T. Theory of discrete event logistics systems (DELS) specification / G. Thiers L. F. McGinnis, C. Bock // National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, 2020. 65 p.

Dudchenko S.V.

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE NAVIGATION ENVIRONMENT FOR PLANNING A GUARANTEED WIRING LANE AND PLANNING THE OPTIMUM ROUTE OF THE PASSAGE OF VESSELS

A systematic planning process ensures the development of a detailed and appropriate transition plan, which allows the shipmaster to respond in advance to critical situations and important areas during the ship's movement. The assessment process consists in collecting, processing and analyzing all information about the navigational situation. This process allows the shipmaster to clearly and accurately identify and delineate all areas where dangerous situations may arise. The navigation situation is characterized by a high intensity of territorial activity (freight and passenger transportation, mining, research, defense activities, fishing, etc.), a multitude of navigational hazards (the bottom has a complex topography, shallow depths, ice, currents, the influence of land) and the variability of hydrometeorological conditions Various geo-information tools are used on the drawbridge to display and analyze the territorial situation. A feature of ship geoinformation systems is their focus on solving a wide range of problems. However, to implement a holistic and systematic approach to the implementation of the concept of e-Navigation. Harmonized collection, integration, exchange, presentation and analysis of navigational information between ship and shore services by electronic means should be carried out. Therefore, it is expedient to consider the possibility of creating an apparatus for formalizing the navigation situation, which allows unambiguous separation of information and mechanisms of its processing in the modeling process. The work improves the mathematical model of the navigation situation for planning the guaranteed routing lane and planning the optimal route for the passage of vessels, the basis of which, unlike the known ones, is the formalism of discrete effective systems with elements of fuzzy logical derivation, which allows to increase the efficiency and accuracy of modeling a complex navigation situation with a large the number of navigational hazards.

Keywords: *voyage planning, e-Voyage, e-Navigation, navigation situation, transition route, wiring lane.*

УДК 621.431.017.7.018.2 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.30

Шапран Ю.Є.

АНАЛІЗ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДИЗЕЛЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДИ В ЯКОСТІ ПРИСАДКИ ДО ПАЛИВА

Дане дослідження полягає у поліпшення екологічних властивостей суднових дизельних установок за допомогою використання водопаливної емульсії. У ході проведено дослідження виконано аналіз стану екологічності сучасних суднових енергетичних установок (СЕУ), визначено норми викидів шкідливих речовин; обґрунтовано застосування водопаливної емульсії для підвищення екологічності СЕУ; проведено теоретичне дослідження процесу кавітації у краплі водопаливної емульсії та досліджено робочий процесу дизеля на дизельному паливі з присадкою води.

Ключові слова: суднова енергетична установка, паливо, екологічність, екологія, енергетична ефективність.

Актуальність дослідження

На початку XXI століття екологи всього світу б'ють на сполох через проблему глобального потепління та втрату контролю над викидами шкідливих речовин (в першу чергу газів) у повітря. Зростання транспортної інфраструктури, збільшення кількості автомобілів, локомотивів, суден, призводить до підвищення об'ємів викидів парникових газів та оксидів азоту NO_x й оксидів сірки SO_x, які є основними забруднювачами повітря.

Збільшення об'ємів морських перевезень призводить до збільшення кількості суден на водних шляхах. Тому зменшення викидів забруднюючих речовин працюючим дизелем є одним з найважливіших завдань забезпечення екологічності експлуатації водного транспорту, від вирішення якої залежить не тільки стан здоров'я людини в найближчій перспективі, а й безпеки всієї планети. Отже дане дослідження, що спрямоване на підвищення екологічних характеристик суднових дизелів, є ***актуальними***.

Метою дослідження є поліпшення екологічних характеристик судового дизеля за рахунок використання водопаливної емульсії.

Аналіз джерел. Питання екологічності СЕУ достатньо повно розглядається у роботах як вітчизняних, так і закордонних фахівців, що умовно можна розділити на ряд груп:

– роботи з дослідження конструктивних особливостей СЕУ та вдосконалення саме конструкції двигунів для підвищення їх екологічності;

– роботи з конструювання додаткових елементів СЕУ, які можуть бути розміщені в корпусах суден без суттєвих змін їх конструкції;

– роботи зі зміни виду палива (застосування домішок) для СЕУ, що призводить до підвищення їх екологічності;

– роботи з підвищення екологічності інших двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) (автомобільних, тракторних тощо);

Виклад основного матеріалу. Наявність множини суперечливих відомостей щодо застосуванням ВПЕ обумовлює необхідність провести додаткові комплексні теоретичні та експериментальні дослідження в галузі вивчення робочого процесу дизеля на паливах з присадкою води різної дисперсності.

Якщо вміст води в паливі становить 15–40% від обсягу використовуваного палива, то димність знижується в 3–4 рази, а концентрація оксидів азоту на виході стає значно меншою – від 30 до 50%. [40, 41].

Проте, результати наукових досліджень інших авторів, метою яких було скорочення концентрації оксидів азоту хоча б на 20% – були негативними [42].

Загалом, при аналізі опублікованих результатів випробувань можна зробити висновок про те, що залежність даних показників пов'язана безпосередньо з кількістю води у паливі. При збільшенні частки води у ВПЕ – знижується температура та димність відпрацьованих газів, а також відбувається зменшення концентрації оксидів азоту.

Також за рахунок застосування ВПЕ максимальна температура циклу зменшується на 150–200 градусів, а локальні температури в обсязі камери згоряння знижуються на 400–500 градусів, що призводить до зменшення концентрації оксидів азоту.

Існує також протиріччя щодо впливу застосування ВПЕ на питому ефективну витрату палива. Одні дослідження стверджують про економію палива під час використання ВПЕ: на 4–10% у високооборотних двигунах (ВОД) і на 3–6% у середньооборотних (СОД) та малооборотних (МОД) суднових двигунах. Також зафіксовано зниження температури ВГ на 2–3%. Отриманий результат пояснюється вдосконаленням процесу сумішоутворення та підвищенням ефективності процесу згоряння палива.

В інших роботах стверджується, що при використанні ВПЕ порівняно з безводним паливом витрата дизельного палива збільшується. Це явище пояснюється тим, що деяка кількість теплоти, що виділяється в процесі згоряння втрачається, оскільки спрямовується на нагрівання й випаровування води, що знаходиться у ВПЕ.

Розбіжність результатів досліджень пояснюють різними умовами під час проведення випробувань дизелів. На економічні та екологічні показники впливають відмінності в конструкції дизеля, якість палива, режими роботи, вміст води у ВПЕ, дисперсність та множина інших факторів.

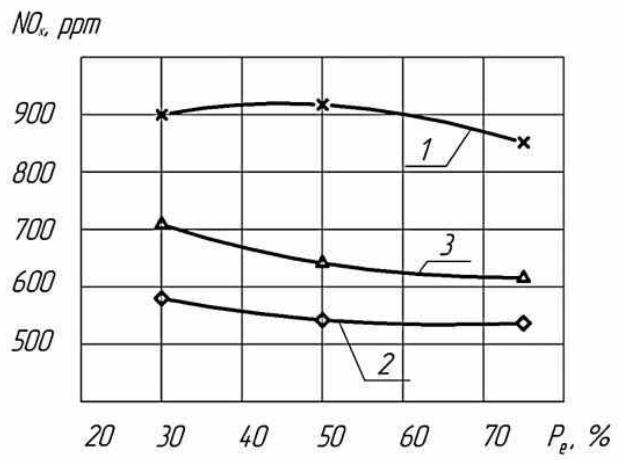
Тому більшість вчених дійшла висновку, що домогтися зменшення витрати палива під час роботи на ВПЕ (порівняно з безводним паливом) можна тільки при «зіпсованому» з будь-яких причин робочому процесі, або при використання дешевих низькоякісних важких сортів палива. Більшість дослідників дійшли висновку, що оптимальна кількість води, що перебуває у ВПЕ, становить 15–17% для дизельного палива та 23–25% – для важких палив.

Одним з важливих факторів, що впливає на робочий процес дизеля, є дисперсність ВПЕ. Тут також існує багато суперечливих відомостей.

У роботі [43] зазначається, що при зменшенні дисперсності емульсії концентрація оксидів азоту у ВГ дизеля зменшується при одночасному збільшенні питомої витрати палива.

Також є відомості, що мінімальні показники витрати дизельного палива спостерігаються при певній дисперсності водної фази з показником від 2 до 15 мкм. При розмірі крапель, що виходить за межі даного показника, витрата палива збільшується.

На рис. 1 наведені навантажувальні характеристики дизеля потужністю 73,6 кВт при роботі на ВПЕ різної дисперсності [43].



NO_x – концентрація оксидів азота;
d_w – діаметр часточок води, мкм;
1 – безводне дизельне паливо;
2 – діаметр часточок води в емульсії $d_w = 3{,}9$ мкм;
3 – діаметр часточок води в емульсії $d_w = 7{,}7$ мкм.

Рисунок 1 – Вплив дисперсності емульсії на концентрацію азота, що міститься у ВГ

Зменшення дисперсності ВПЕ веде до зменшення концентрації оксиду азоту NO_x. Зі збільшенням дисперсності також спостерігається і зменшення витрат палива. Однак, і в цьому випадку витрата отримана більше, ніж на безводному паливі.

При роботі на дрібнодисперсній емульсії вмістні частинки води у 0,20 мкм на всіх навантаженнях, питома ефективна витрата палива виявилася меншою, ніж на безводному паливі. Розглянемо особливості процес горіння вуглеводневого палива у присутності води.

Пари води надають хімічну та каталітичну дію на процес згоряння палива в циліндрі дизеля. У зневоднених сумішах спостерігається неповне згоряння окису вуглецю, але у разі

підвищення вологості на 1% відбувається повне згоряння СО. Цьому сприяє каталітична властивість парів води, за рахунок часткового розкладання води на водень, кисень і гідроксильну групу.

Приблизно однакові резонансні частоти коливань молекул води і кисню дозволяють легко передавати енергію від молекули до молекули. У теорії горіння та ланцюгових реакцій докладно розкрита каталітична властивість і дія парів води. Згідно цієї теорії, процес перетворення вихідних речовин на кінцеві продукти відбувається через проміжні хімічні реакції.

Швидкості ланцюгової реакції на першому етапі процесу окислення визначається концентрацією атомарного водню. Подальший хід реакції протікає екзотермічно, із прискоренням та збільшенням температури.

Вплив води на процеси горіння вуглецевого палива був вивчений в експериментах, проведених групою вчених. Сутність експерименту полягала в подачі води, у складі якої знаходилися ізотопи кисню. Аналіз вуглекислоти у ВГ показав наявність близько 45% ізотопів кисню.

Дисоціація води виконувалася за такою схемою:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2; \quad (1)$$

$$2H_2O \rightarrow H_2 + 2OH. \quad (2)$$

Продукти даних реакцій беруть активну участь у процесі горіння. Крім того, поставлений дослід довів, що використання води як присадки до палива чи повітря збільшує кількість активних центрів горіння. В результаті відбувається прискорення хімічної реакції окислення.

Це підтверджено результатами стендових випробувань дизеля. Масспектрометричний аналіз продуктів згоряння дизеля довів, що 60% води, що входить до складу ВПЕ, безпосередньо бере участь в окисленні вуглеводневого палива. Зважаючи на неоднозначність наявних відомостей за результатами випробувань двигунів на ВПЕ, необхідно провести додаткові теоретичні та експериментальні дослідження робочого процесу дизеля на паливах із присадкою води різної дисперсності.

Процеси випаровування крапель безводного дизельного палива та крапель водопаливної емульсії значно відрізняються. Температура кипіння води у нормальних умовах відбувається при 100ºС.

Перегін половини всього палива здійснюється при температурі, що дорівнює 360ºС. А у легких фракціях дизельного палива кипіння починається вже за 188-210ºС. [26].

Висновки: Результатами багатьох досліджень встановлено:

– після втрати стійкості, з часом, швидкість зростання парогазової пухирця починає різко збільшується.

– зі збільшенням дисперсності ВПЕ швидкість зростання парогазової пухирця знижується, а час його існування збільшується.

Відомо, що при використанні водяної присадки до палива пари води, що містяться в горючій суміші, мають хімічну та каталітичну дію на процес горіння.

Для збільшення часу каталітичного та хімічного механізму взаємодії парів води з паливом можна рекомендувати збільшення дисперсності ВПЕ до стану колоїдного розчину. В результаті слід очікувати комплексного покращення енергетичних та економічних характеристик дизеля.

Shapran Yu.E.

ANALYSIS OF DIESEL WORKING PROCESS USING WATER AS A FUEL ADDITIVE

This study consists in improving the environmental properties of marine diesel installations using a water-fuel emulsion. In the course of the research, an analysis of the state of environmental friendliness of modern ship power plants was performed, the norms of emissions of harmful substances were determined; the use of water-fuel emulsion to improve the environmental friendliness of SEU is substantiated; a theoretical study of the process of cavitation in a drop of water-fuel emulsion was carried out and the working process of a diesel engine on diesel fuel with water additive was investigated.

Key words: ship power plant, fuel, environmental friendliness, ecology, energy efficiency

ЛІТЕРАТУРА

1. Шевченко В. А., Онищенко О. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективностіі тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів.*4th International scientific and practical conference "Perspectives of world science and education" (December* 25-27, 2019) *CPN Publishing Group, Osaka, Japan*. 2019, p.p. 995-1005.

2. Nakagawa, H. Huxon kukay gankaish / H. Nakagawa, M. Tatishi. –// I. Jap. Mech. Eng., 81. – 1987. - № 720 - P. 1201–1207.

3. Hamid, A. Emulsion ean-fuel of emulsion ean fuel-combustible pour motors a pollution ambient reguite / A. Hamid. - These dock. 1 ug. Univ. Pierre at Marie Gurie Paris, 1976. - 81 p.

4. Test show emulsified fuel of little value in large-bore diesel engines / Fairplay Int. Shipp. – Weekly, 292. – 1985. – №5293. – 27 p.

5. Zhang, T. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels / T. Zhang, H. Okada, T. Tsukamoto, K. Ohe. - CIMAC 2007, Vienna. – 193 p.

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

УДК 531.2:532.3 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.31

Горалік Є.Т., Лупіна Т.О.

ДЕЯКІ ЗАДАЧІ ПРО ОСТІЙНІСТЬ ПЛАВЗАСОБІВ В КУРСАХ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ

Метою статті є розробка та апробація методики розв'язання деяких задач про остійність плавзасобів для практичних занять та розрахунково-графічних робіт з курсів теоретичної та прикладної механіки для студентів спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт».

На основі положень теорії початкової статичної остійності суден розглянуто задачі з розрахунку початкової поперечної метацентричної висоти плавзасобу з корпусом у вигляді прямокутного паралелепіпеда та побудови його метацентричних діаграм, а також задачі з розрахунку висоти розташування центру мас вантажу над палубою плавзасобу при заданому значенні його поперечної метацентричної висоти. Наведено необхідні для розв'язання запропонованих задач аналітичні розрахункові залежності, обчислення за якими виконувались з використанням програми Microsoft Excel.

Апробація методик розв'язування задач здійснена на прикладі сталевого понтона вантажопідйомністю 100 кН, корпус якого вагою P_n=20,8 кН має форму прямокутного паралелепіпеда розмірами 2,4×0,9×9,0 м. Розрахунки проводились для випадку розташування центру ваги вантажу на одній вертикалі з центром ваги корпусу понтона при послідовному ступеневому збільшенні ваги вантажу в діапазоні від 10 до 100 кН з кроком 10 кН.

Результати розрахунків представлені у вигляді таблиць та графіків залежностей: осадки понтона, аплікат центру величини, центру ваги, метацентру, метацентричного радіусу та метацентричної висоти понтона від ваги вантажу при заданій висоті його розташування над палубою; висоти розташування центру ваги вантажу над палубою в залежності від заданої метацентричної висоти та ваги вантажу. Проведено аналіз розрахункових даних. Описано послідовність визначення параметрів остійності на основі графіків метацентричної діаграми понтона.

Зроблено висновок про доцільність використання запропонованих методик розрахунку для практичних занять та розрахунково-графічних робіт з теоретичної та прикладної механіки зі студентами спеціальності «Морський та внутрішній водний транспорт».

Вступ. Міцні знання з природничо-технічних дисциплін є необхідною умовою успішного засвоєння студентами дисциплін циклу професійної і практичної підготовки.

Підвищення мотивації до ґрунтовного вивчення студентами фундаментальних і загально-технічних дисциплін можна досягти шляхом більшого орієнтування на професію, використовуючи задачі, максимально наближені до їх майбутньої практичної діяльності.

Для студентів спеціальності «Морський та внутрішній водний транспорт» до таких задач відносяться різноманітні задачі механіки плаваючих тіл [1], які розв'язуються методами теоретичної механіки. Студенти проявляють зацікавленість до задач про рівновагу плавзасобів, що, зокрема, підтверджується їх доповідями на науково-практичних конференціях ДУІТ [2, 3].

Нажаль, в більшості підручників з теоретичної механіки [4, 5, 6] питання рівноваги плаваючих тіл не розглядаються. В збірниках задач з теоретичної механіки [7, 8] відповідні

задачі також відсутні. Проблема стійкості рівноваги плаваючих тіл в підручниках та навчальних посібниках з теоретичної та прикладної механіки висвітлюється досить рідко [9, 10].

Постановка проблеми. Як відомо з [11, 12], умова стійкості рівноваги (початкової остійності) судна та інших плавзасобів полягає в тому, щоб його поперечний метацентр М знаходився вище центру ваги G, тобто щоб значення початкової метацентричної висоти h_0, що визначається з виразу $h_0 = z_c + r - z_g$ (рис.1), було додатним. Тоді відновлювальний момент $M_B = D' \cdot l$ при нахилі судна повертатиме його в початкове вертикальне положення.

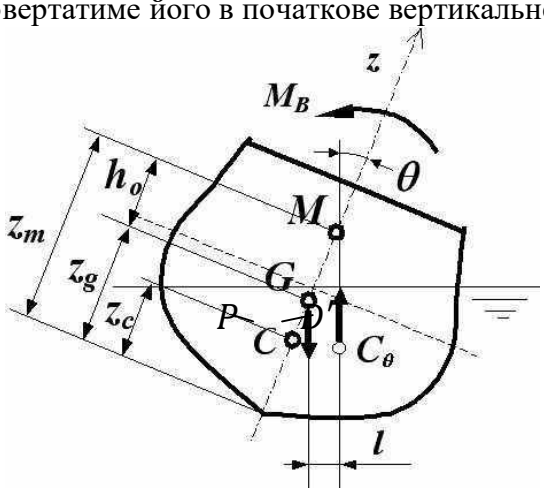


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на нахилене судно:
M_B – відновлювальний момент, що перешкоджає перекиданню судна; l – плече відновлювального моменту; P – вага судна; D' – сила підтримання судна; z_C – апліката центру величини; r – поперечний метацентричний радіус; h_0 – початкова метацентрична висота як основна характеристика остійності судна; z_g – апліката центру ваги судна.

Центр величини C (точка прикладання сили плавучості) знаходиться в центрі ваги підводного об'єму корпусу.

Поперечний метацентр M (центр кривизни кривої переміщення центру величини) – в поперечній площині.

Поперечний метацентричний радіус r (радіус кривизни кривої переміщення центру кривизни в поперечній площині) обчислюється за формулою

$$r = \frac{I_x}{V},$$

тобто поперечний метацентричний радіус дорівнює моменту інерції I_x площі ватерлінії відносно поздовжньої осі, що проходить через центр ваги цієї площі, поділеному на об'ємну водотоннажність V, яка відповідає цій ватерлінії.

Сила підтримання D' судна обчислюється за формулою

$$D' = \gamma \cdot V.$$

Питома вага води γ є змінною величиною. При розрахунках зазвичай приймають $\gamma = 10{,}05$ кН/м^3 для морської води і $\gamma = 9{,}81$ кН/м^3 для прісної води.

Плече відновлювального моменту l визначається з виразу

$$l = h_0 \cdot \sin\theta.$$

Тоді відновлювальний момент при малих кутах крену:

$$M_в = D \cdot h_0 \cdot \sin\theta.$$

При малих кутах крену замість $\sin\theta$ в останню формулу можна підставити кут крену θ в радіанах. Тоді вона отримає вигляд:

$$M_в = D \cdot h_0 \cdot \theta.$$

Ці формули для відновлювального моменту є метацентричними формулами поперечної остійності.

З практики відомо, що метацентричними формулами можна користуватися аж до $\theta \leq (10 \div 12)°$ [11].

При розташуванні вантажу на палубі загальний центр ваги плавзасобу з вантажем зміщується вгору відносно положення його центру ваги без вантажу і може, при певних умовах, опинитися вище метацентру, що призведе до перекидання плавзасобу.

Якщо апліката центру ваги судна дорівнює аплікаті його метацентру, маємо випадок нейтральної рівноваги. При цьому плече відновлювального моменту не створюється ні при якому куті крену. В результаті судно залишається в нахиленому положенні до тих пір, доки зберігається нейтральна (нульова) остійність.

На практиці для швидкого визначення положення аплікат центру величини z_c, центру ваги судна z_g, поперечного метацентру z_m та початкової метацентричної висоти h_0 при будь якій осадці T судна використовують метацентричні діаграми.

Мета дослідження полягає в розробці та апробації методики розрахунку початкової поперечної метацентричної висоти і висоти розташування центру мас вантажу при заданому значенні метацентричної висоти над палубою плавзасобу з корпусом у вигляді прямокутного паралелепіпеда, розрахунку і побудови метацентричних діаграм плавзасобу методами теоретичної механіки.

Основний матеріал. Розглянемо методику і результати розрахунків аплікат центру величини, центру ваги, поперечного метацентру, початкової поперечної метацентричної висоти, висоти розташування центру ваги вантажу над палубою при заданому значенні метацентричної висоти та побудову метацентричної діаграми плавзасобу на прикладі прямокутного сталевого понтону вагою P_n=*20,8* кН, вантажопідйомністю 100 кН, розмірами $L = 9$ м, $B = 2{,}4$ м, $H = 0{,}9$ м з розташованим на палубі вантажем, вага якого P_B змінюється за величиною від 10 до 100 кН, а центр ваги розташований на одній вертикалі з центром ваги понтона (Рис. 2).

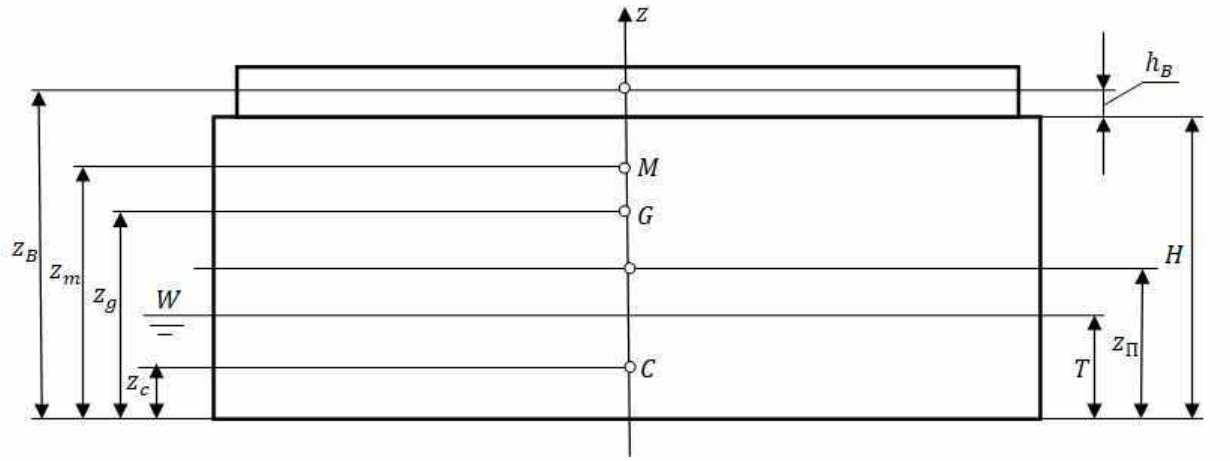


Рисунок 2 – Поперечний переріз понтона з вантажем

Розрахунки проведені за наступними формулами.

Осадка понтона

$$T = \frac{P_П + P_B}{L \cdot B \cdot \gamma}.$$

Апліката центру величини

$$z_c = \frac{T}{2}.$$

Об’єм зануреної частини понтона

$$V = L \cdot B \cdot T.$$

Момент інерції ватерлінії відносно поздовжньої осі симетрії

$$I_x = \frac{L \cdot B^3}{12}.$$

Метацентричний радіус

$$r = \frac{I_x}{V}.$$

Апліката метацентру

$$z_m = z_c + r\,.$$

Апліката центру ваги понтона без вантажу

$$z_П = \frac{H}{2}.$$

Апліката центра ваги вантажу

$$z_B = H + h_B.$$

Апліката загального центру ваги понтона з вантажем

$$z_g = \frac{P_П \cdot z_П + P_B \cdot z_B}{P_П + P_B}.$$

Початкова метацентрична висота понтона з вантажем

$$h_0 = z_m - z_g\,.$$

Значення висоти розташування центру мас вантажу при заданій початковій метацентричній висоті в залежності від ваги вантажу обчислено за формулою

$$h_B = \frac{P_П + P_B}{P_B} \cdot \left(z_c + r - h_0 - \frac{P_П \cdot z_П}{P_П + P_B} - \frac{P_B \cdot H}{P_П + P_B}\right).$$

Розрахунки проведено для випадку плавання понтону в прісній воді ($\gamma = 9{,}81$ кН/м^3).

Результати розрахунків осадки, аплікат центру величини, центру ваги, поперечного метацентру та поперечного метацентричного радіусу і метацентричної висоти понтона при висоті розташування центру ваги вантажу над палубою $h_B = 0{,}35\,м$ представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків осадки T, аплікат z_c, z_g, z_m та метацентричного радіусу r і метацентричної висоти h_0, в залежності від ваги вантажу Pв.

Рв, кН	10	20	30	40	50	60	70		90	100
Т, м	0,145	0,192	0,240	0,287	0,334	0,381	0,428	0,476	0,523	0,570
$z_c, м$	0,073	0,096	0,120	0,143	0,167	0,191	0,214	0,238	0,261	0,285
$z_g, м$	0,710	0,842	0,922	0,976	1,015	1,044	1,067	1,085	1,100	1,112
$z_m, м$	3,375	2,589	2,122	1,816	1,604	1,449	1,335	1,247	1,179	1,127
$r, м$	3,302	2,493	2,002	1,673	1,437	1,259	1,120	1,009	0,918	0,842
$h_0, м$	2,665	1,747	1,200	0,840	0,589	0,405	0,268	0,162	0,079	0,015

З аналізу представлених в табл. 1 даних видно, що осадка понтона і апліката центру величини при збільшенні ваги вантажу від 10 кН до 100 кН зростають лінійно з 0,145 м до 0,57 м і з 0,073 м до 0,285 м відповідно. Апліката центру ваги понтона з вантажем при цьому теж зростає з 0,710 м до 1,112 м, однак швидкість її зростання зі зростанням ваги вантажу зменшується. Апліката метацентру та метацентрична висота зі зростанням ваги вантажу у тому ж діапазоні значень навпаки спадають з 3,302 м до 0,842 м і 2,665 м до 0,015 м. При цьому зі зростанням ваги вантажу швидкість зменшення аплікати метацентру та метацентричної висоти теж зменшується.

Метацентрична діаграма понтона, побудована за результатами проведених розрахунків представлена на рис. 3.

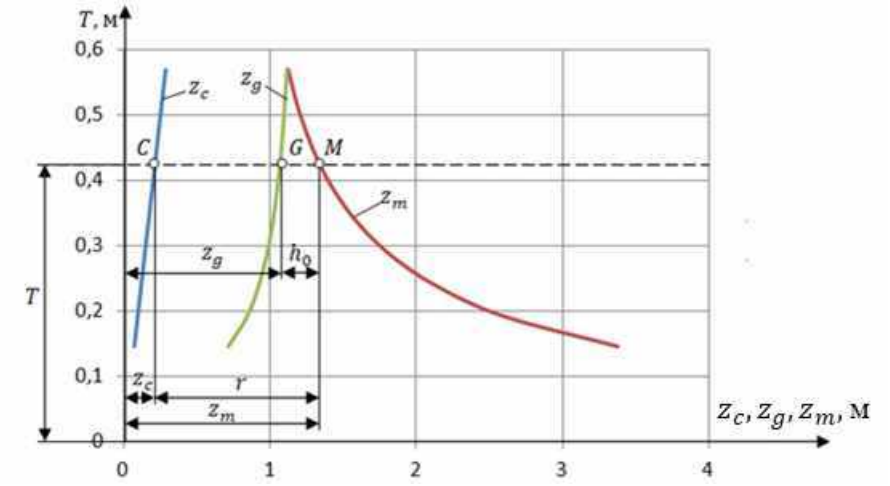


Рисунок 3 – Метацентрична діаграма понтона

Метацентричний радіус r та метацентричну висоту h_0 за допомогою цієї діаграми визначають наступним чином. На вертикальній осі відкладають потрібне значення осадки T, проводять горизонтальну лінію, яка відповідає цій осадці, до перетину її з кривими z_c, z_g та z_m і вимірюють відстані від точок перетину, тобто точок C, G і M, до вертикальної осі. Ці відстані у вибраному масштабі визначають значення аплікат z_c, z_g і z_m. Метацентричний радіус обчислюють як різницю аплікат z_m і z_c, а початкову метацентричну висоту – як різницю аплікат z_m і z_g.

Результати розрахунків висоти розташування центру ваги вантажу h_B, при якій метацентрична висота понтону з вантажем $h_0 = 0$ м, (понтон знаходиться в стані нейтральної рівноваги) та при $h_0 = 0{,}2$ *м* залежно від величини вантажу представлені в табл. 2 та на рис. 4.

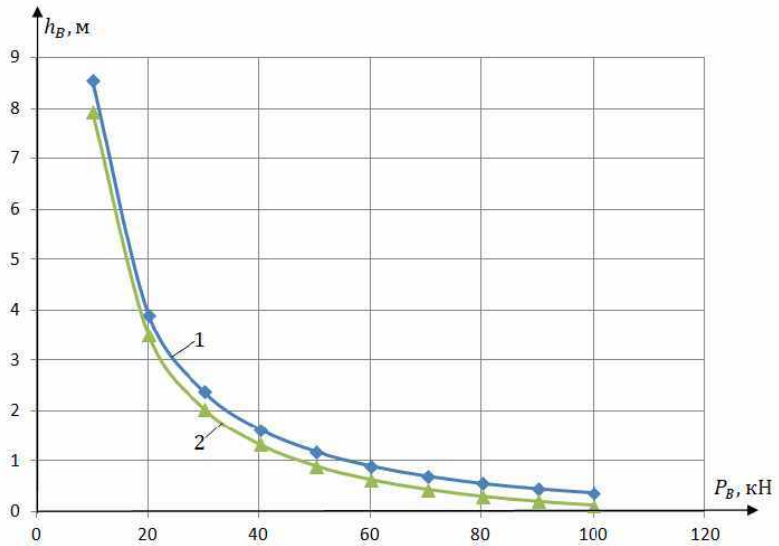


Рисунок 4 – Залежності висоти розташування центру ваги вантажу h_B від ваги вантажу P_B при метацентричній висоті $h_0 = 0$ м (1) та $h_0 = 0{,}2$ м (2)

Таблиця 2. Результати розрахунків висоти розташування центру ваги вантажу над палубою h_B залежно від заданої метацентричної висоти h_0 та ваги вантажу P_B.

Рв, кН	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
h_0=0 м										
h_B, м	8,559	3,913	2,381	1,627	1,184	0,896	0,697	0,554	0,448	0,368
h_0=0,2 м										
h_B, м	7,943	3,506	2,043	1,323	0,900	0,627	0,438	0,302	0,202	0,126

З представлених в табл. 2 та на рис.4 даних видно, що зі збільшенням величини вантажу P_B від 10 до 100 кН значення висоти розташування центру мас вантажу над палубою понтона h_B зменшується. Графіки залежності подібні за формою до гіперболи. Причому графік 1 для випадку нейтральної рівноваги розташований вище графіку 2 для випадку h_0=0,2 м. Висота h_B при вазі вантажу 10 кН у випадку нейтральної рівноваги та при h_0=0,2 м складала 8,559 м і 7,943 м відповідно, а при вазі вантажу 100 кН - 0,368 м і 0,126 м. Причому швидкість зменшення h_B зі зростанням величини P_B в обох випадках також значно зменшується. Так, при зміні P_B від 10 до 20 кН значення h_B у випадку нейтральної рівноваги зменшились на 4,646 м, а при зміні P_B від 90 до 100 кН - лише на 0,08 м. У випадку h_0=0,2 м при зміні P_B від 10 до 20 кН значення h_B зменшилось на 4,437 м, а при зміні P_B від 90 до 100 кН - на 0,076 м.

Висновки. Запропоновано розрахункові залежності та методика розрахунку параметрів початкової поперечної остійності плавзасобів з корпусом у формі прямокутного паралелепіпеду з урахуванням величини та розташування центру ваги вантажу.

Проведено розрахунки параметрів остійності на прикладі прямокутного сталевого понтону вагою P_n=*20,8* кН, вантажопідйомністю 100 кН, розмірами $L = 9$ м, $B = 2{,}4$ м, $H = 0{,}9$ м з розташованим на палубі вантажем, вага якого P_B змінюється за величиною від 10 до 100 кН, а центр ваги розташований на одній вертикалі з центром ваги понтона.

За результатами розрахунків побудовано метацентричну діаграму понтона та розглянуто її використання.

Отримано і проаналізовано залежності висоти розташування центру ваги вантажу від його величини при заданих значеннях поперечного метацентричного радіусу.

Отримані результати можуть бути використані на практичних заняттях з теоретичної та прикладної механіки зі студентами спеціальності «Морський та внутрішній водний транспорт».

ЛІТЕРАТУРА

1. Горалік Є.Т., Лупіна Т.О. Деякі задачі механіки для студентів напряму підготовки «Морський та річковий транспорт». Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту. – Київ: КДАВТ 2014, №2 (20). – С. 158-165.

2. Путята П. гр. 2017ск, наук.кер. Лупіна Т.О. Оцінка метацентричного радіусу плавзасобу. Збірник тез науково-практичної конференції студентів, аспірантів і викладачів ДУІТ, Київ-2021. – С. 422-424.

3. Грищенко Є. гр. 2115, наук. кер. Горалік Є.Т. Про вплив форми корпусу на остійність плавзасобу. Збірник тез науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, молодих вчених та викладачів ДУІТ, Київ-2023. – С. 372-375.

4. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

5. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ/ за заг.ред. І.В.Кузьо. Харків: Фоліо, 2017. – 780 с.

6. Deleanu, Dumitru Theoretical mechanics. Theory and applications / Dumitru Deleanu – Constanta: Nautica, 2012. – 295 с.

7. Теоретична механіка: Збірник задач /О.С.Апостолюк, В.М.Воробйов, Д.І.Ільчишина та ін..; За ред. М.А.Павловського. – К.: Техніка, 2007. – 400 с.

8. Козицький С. В. Теоретична механіка. Задачі і приклади їх розв'язання [Текст]. навчальний посібник / С. В. Козицький, О. М. Латиш, О. І. Швець. - Видання 2-е доповнене та перероблене. – Одеса: ОНМА, 2013. – 369 с.

9. Козицкий, С. В. Курс теоретической механики [Текст] : учеб. пособие для студентов и курсантов учеб. заведений мор. профиля / С. В. Козицкий, В. Х. Кириллов, Ф. Н. Иванченко. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Одесса : Атлант, 2013. – 294 с.

10. Іванченко Ф. М., Козицький С. В. Основи теоретичної та прикладної механіки. Одесса: Вид. «Апрель», 2016. - 252 с.

11. Донцов С. В. Основы теории судна: учебное пособие/С.В.Донцов. – Одесса: Феникс, 2007. – 142 с.

12. Віктор Горбов. Енциклопедія суднової енергетики: підручник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 624 с.

REFERENCES

1. Horalik Ye.T., Lupina T.O. (2014). Deiaki zadachi mekhaniky dlia studentiv napriamu pidhotovky "Morskyi ta richkovyi transport" [Some Problems of Mechanics for Students of the Direction of Training "Sea and River Transport"]. Vodnyi transport. Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoi derzhavnoi akademii vodnoho transportu. – Kyiv: KDAVT 2014, №2 (20). – S. 158-165.

2. Putiata P. hr. 2017sk, nauk.ker. Lupina T.O. Otsinka metatsentrychnoho radiusu plavzasobu [Estimation of the metacentric radius of the watercraft]. Zbirnyk tez naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i vykladachiv DUIT, Kyiv-2021. – S. 422-424.

3. Hryshchenko Ye. hr. 2115, nauk. ker. Horalik Ye.T. Pro vplyv formy korpusu na ostiinist plavzasobu [On the Influence of the Hull Shape on the Stability of the Watercraft]. Zbirnyk tez naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity, molodykh vchenykh ta vykladachiv DUIT, Kyiv-2023. – S. 372-375.

4. Pavlovskyi M.A. Teoretychna mekhanika: Pidruchnyk [Theoretical Mechanics: Textbook]. – K.: Tekhnika, 2002. – 512 s.

5. Teoretychna mekhanika: pidruchnyk dlia studentiv VNTZ [Theoretical Mechanics: Textbook for VNTZ Students]/ za zah.red. I.V.Kuzo. Kharkiv: Folio, 2017. – 780 s.

6. Deleanu, Dumitru Theoretical mechanics. Theory and applications / Dumitru Deleanu – Constanta: Nautica, 2012. – 295 c.

7. Teoretychna mekhanika: Zbirnyk zadach [Theoretical Mechanics: Collection of Problems] /O.S.Apostoliuk, V.M.Vorobiov, D.I.Ilchyshyna ta in..; Za red. M.A.Pavlovskoho.– K.: Tekhnika, 2007. – 400 s.

8. Kozytskyi S. V. Teoretychna mekhanika. Zadachi i pryklady yikh rozviazannia [Tekst]. navchalnyi posibnyk [Theoretical Mechanics. Problems and examples of their solution [Text]. Tutorial] / S. V. Kozytskyi, O. M. Latysh, O. I. Shvets. - Vydannia 2-e dopovnene ta pereroblene.– Odesa: ONMA, 2013. – 369 s.

9. Kozytskyi, S. V. Kurs teoretycheskoi mekhanyky [Tekst] : ucheb. posobye dlia studentov y kursantov ucheb. zavedenyi mor. profylia [Course of Theoretical Mechanics [Text] : Handbook for Students and Cadets of Studies. establishments of the sea. Profile] / S. V. Kozytskyi, V. X. Kyryllov, F. N. Yvanchenko. - Yzd. 2-e, pererab. y dop. - Odessa : Atlant, 2013.– 294 s.

10. Ivanchenko F. M., Kozytskyi S. V. Osnovy teoretychnoi ta prykladnoi mekhaniky [Fundamentals of Theoretical and Applied Mechanics]. Odessa: Vyd. «Aprel», 2016. - 252 s. Основи теоретичної та прикладної механіки. Одесса: Вид. «Апрель», 2016. - 252 с.

11. Dontsov C. B. Osnovy teoryy sudna: uchebnoje posobyje [Fundamentals of Ship Theory: A Study Guide]/S.V.Dontsov. – Odessa: Fenyks, 2007. – 142 s.

12. Viktor Horbov. Entsyklopediia sudnovoi enerhetyky: pidruchnyk.[Encyclopedia of Ship Energy: Textbook] – Mykolaiv: NUK, 2010. – 624 s.

Goralik J.T., Lupina T.O.

SOME PROBLEMS ABOUT THE STABILITY OF WATERCRAFT IN THE COURSES OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS

The aim of the article is to develop and test a methodology for solving some problems about the stability of watercraft for practical classes and computational and graphic work on the courses of theoretical and applied mechanics for students of the specialty 271 "Sea and Inland Water Transport".

On the basis of the provisions of the theory of initial static stability of ships, the problems of calculating the initial transverse metacentric height of a watercraft with a hull in the form of a rectangular parallelepiped and the construction of its metacentric diagrams, as well as the problems of calculating the height of the center of mass of cargo above the deck of the watercraft at a given value of its transverse metacentric height are considered. The analytical calculation dependencies necessary for solving the proposed problems are presented, calculations for which were carried out using Microsoft Excel.

Approbation of methods for solving problems was carried out on the example of a steel pontoon with a carrying capacity of 100 kN, the body of which weighing P = 20.8 kN has the shape of a rectangular parallelepiped with dimensions of 2.4×0.9×9.0 m.

The results of the calculations are presented in the form of tables and graphs of dependencies: pontoon draught, application of the center of magnitude, center of gravity, metacenter, metacentric radius and metacentric height of the pontoon from the weight of the cargo at a given height of its location above the deck; the height of the location of the center of gravity of the cargo above the deck depending on the specified metacentric height and weight of the cargo. An analysis of the estimated data has been carried out. The sequence of determining the stability parameters on the basis of the graphs of the metacentric pontoon diagram is described.

It is concluded that it is expedient to use the proposed calculation methods for practical classes and computational and graphic works on theoretical and applied mechanics with students of the specialty "Maritime and Inland Water Transport".

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9, 004.48 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.32

Ткаченко К.О., Ісаченко Б.О.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕЙМІФІКАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ТА ЇХ ВЕБДИЗАЙНІ

Розглянуто проблематику інформатизації та інтелектуалізації процесів навчання із застосуванням новітніх технологій на прикладі розробки інформаційних (з елементами інтелектуалізації) навчальних систем, що використовують гейміфікацію як при навчанні, так і при розробці відповідного вебдизайну системи.

Гейміфікація стає в наш час тим інноваційним підходом, що перетворює звичайні (інколи рутинні та нецікаві) задачі та процеси навчання у захоплюючі ігри. В статті розглянуто сутність цього підходу, який стає все більш поширеним та успішним не тільки в сфері розваг, а й в освіті. Відмічається, що використання гейміфікації в інформаційних (з елементами інтелектуалізації) навчальних системах обумовлює зростання впливу на навчальні процеси та дизайн їхніх інтерфейсних підсистем (у веб-орієнтованих системах – на вебдизайн), забезпечуючи високий рівень залученості користувачів та поліпшуючи зручність їх роботи в навчальному online-середовищі.

Проаналізовано деякі аспекти, етапи та принципи розробки вебдизайну інформаційних навчальних систем, що функціонують в умовах online-навчання. Визначено основні задачі гейміфікації, що використовується в інтелектуальних навчальних системах, зокрема, такі, як залучення користувачів; збереження уваги та утримання користувачів; мотивація до певної поведінки; покращення користувальницького досвіду, роблячи використання продукту більш приємним та таким, що приносить задоволення; розвиток навичок та вмінь; стимулювання соціальної взаємодії.

Відзначається, що ігрове навчання сприяє розумінню завдань, тем, навчального контенту як частину системи. Використання гейміфікації надає можливість бачити об'єкти предметної області, що вивчається, зі зв'язками з іншими об'єктами. Крім того важливим є психологічний стан користувачів (наприклад, позитивні емоції, які вони відчувають під час гри), стосунки між учасниками гри, зворотній зв'язок.

У статті розглянуто важливість та переваги гейміфікації у вебдизайні, виокремлено основні поняття, ключові принципи її впровадження та проаналізовано вплив на користувачів. Також розглянуто гейміфіковані вебсайти сучасних найбільш поширених інформаційних навчальних систем.

Ключові слова: *інформаційна система, інтелектуальна система, інформаційна (з елементами інтелектуалізації) навчальна система, навчальний процес, гейміфікація, вебдизайн, геймдизайн, вебсайт, динамічний інтерактивний інтерфейс.*

Вступ. В наш час спостерігаються різноманітні за ступенем важливості тенденції, які обумовлюють вплив на систему освіти України, інформатизацію та інтелектуалізацію процесів навчання. Однією з них є необхідність розробки інформаційних та/або інтелектуальних навчальних систем, що використовують елементи гейміфікації та зручний і комфортний дизайн інтерфейсу. Повнота та коректність сприйняття інформації щодо об'єктів предметної області, яка вивчається, і навчальних процесів, що відбуваються з цими об'єктами, залежать від багатьох факторів.

Гейміфікація є інноваційним підходом, що перетворює звичайні (інколи рутинні та нецікаві) задачі та процеси у захоплюючі ігри. В наш час цей підхід став все більш поширеним та успішним, не тільки в галузі розваг та соціальних мереж, але й у бізнесі, освіті та інших сферах. Використання гейміфікації обумовлює зростання впливу, зокрема, на:

– навчальні процеси в сучасних інформаційних (чи інтелектуальних) навчальних системах;

– дизайн їхніх інтерфейсних підсистем (зокрема, у веб-орієнтованих системах – на вебдизайн), забезпечуючи високий рівень залученості користувачів та поліпшуючи зручність їх роботи в online-середовищі.

При переході від статичних вебсторінок до динамічних інтерактивних інтерфейсів, гейміфікація стала важливим фактором у мотивації інтересу користувачів і забезпеченні їхньої активності на сайтах. Інтеграція елементів гри, таких як винагороди, досягнення та рівні, дозволяє залучити аудиторію й утримати її увагу на протязі тривалого часу. Таким чином, гейміфікація обумовлює необхідність створення вебдизайну навчальної системи, який буде заохочувати користувачів до взаємодії та повернення до системи знову і знову.

Тому актуальність проблематики дослідження та аналізу впливу гейміфікації на вебдизайн в інформаційних (інтелектуальних чи інформаційних з елементами інтелектуалізації) системах не викликає сумнівів.

Постановка проблеми. Підкреслюючи складність проблем, що стоять перед сучасною сферою освіти, її різноманітними процесами, слід розглядати проблеми та результати дослідження сфери інтелектуалізації та інформатизації навчальних процесів і засобів їх оптимізації та підвищення ефективності, індивідуалізації навчання та підвищення рівня мотивації студентів. Тому проблема розробки систем інтелектуалізації навчальних процесів за рахунок застосування елементів гейміфікації та сучасного вебдизайну online-систем є актуальною.

У статті буде розглянуто важливість та переваги гейміфікації у вебдизайні, виокремлено основні поняття, ключові принципи її впровадження та проаналізовано вплив на користувачів. Також буде розглянуто гейміфіковані вебсайти навчальних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Гейміфікація – це використання окремих елементів ігор у неігрових практиках (зокрема, у навчальних системах) [2]. Від інших ігрових форматів гейміфікація відрізняється спрямованістю її учасників на ціль своєї реальної діяльності, а не на гру, як таку. Ігрові елементи інтегруються до реальних ситуацій для мотивації конкретних форм поведінки у заданих умовах і обмеженнях [1].

Популярність гейміфікації обумовлена розвитком IT-технологій, Інтернету і мобільних пристроїв [2]. Використання гейміфікації в різних сферах, зокрема (наприклад, у маркетингу, освіті, медицині, бізнесі, соціальних мережах), де взаємодія з користувачами є важливим фактором успіху [3].

Дизайн вебсайту інтелектуальної навчальної системи позитивно впливає на загальну задоволеність користувачів і сприйняття навчального контенту. Існують деякі питання щодо вебдизайну, наприклад, чи повинні вебсайти мати початкову вебсторінку з коротким описом, який підсумовує те, що є складовими частинами навчального контенту, підкреслювати першочергові завдання на вебсайті, включати пошукове вікно, назви гіперпосилань починати з ключового слова, використовувати графіку та інші різні важливі моменти [5].

Елементам вебдизайну присвячено багато досліджень. Зокрема в [6 – 8] на основі опитувань різних категорій користувачів були досліджені та визначені характеристики дизайну вебсайтів, зокрема, такі, як якість даних, організація, привабливість, технічна адекватність, якість даних, зручність використання, взаємодія, надійність, особливості сторінки, інформація, особливості контенту, дизайн, презентація, навігація, безпека, швидкість та відстеження.

Мета дослідження. Основною метою роботи, що пропонується, є аналіз деяких аспектів гейміфікації для подальшої розробки гейміфікованого підходу при розробці інформаційних (з елементами інтелектуалізації) та інтелектуальних навчальних систем; розширенні класу задач,

які можуть вирішуватися за допомогою геймифікації; визначенні впливу гейміфікації на вебдизайн таких навчальних систем.

Основний матеріал дослідження. Гейміфікація у вебдизайні є потужним інструментом для залучення користувачів. Однак, йдеться не про перетворення користувацьких інтерфейсів на ігри, а про грамотне використання геймдизайну, щоб додати елементи розваг у додатки та системи, які в іншому випадку можуть бути позбавлені безпосередності та актуальності для користувачів.

Якщо це зроблено правильно, у користувачів з'являється стимул для досягнення цілей, що допомагає їм подолати негативні асоціації, обумовлені, наприклад, завданнями, виконання яких потребує система від користувачів.

Динаміка, яку дизайнери включають в успішну гейміфікацію, слугує ефективною внутрішньою мотивацією користувачів до взаємодії з системою. «Мета гейміфікації проста: представити процеси таким чином, щоб їх було цікаво виконувати і мотивувати користувачів продовжувати. Або, принаймні, викликати в них певну цікавість. Зауважте, однак, що зазвичай не корисно тримати вашу цільову групу зайнятою годинами.» [1].

В [1] розглянуто так званий «Цикл Звички» (рис.1). В основу створення цього циклу, є те, що процеси повинні приносити задоволення, а не розглядатися виключно як завдання. Користувачі витрачають понад 40 % свого часу на виконання повторюваних процесів, тому доцільно перетворити процеси у веб-орієнтованій системі (і, зокрема, вебсайті) на приємні звички.

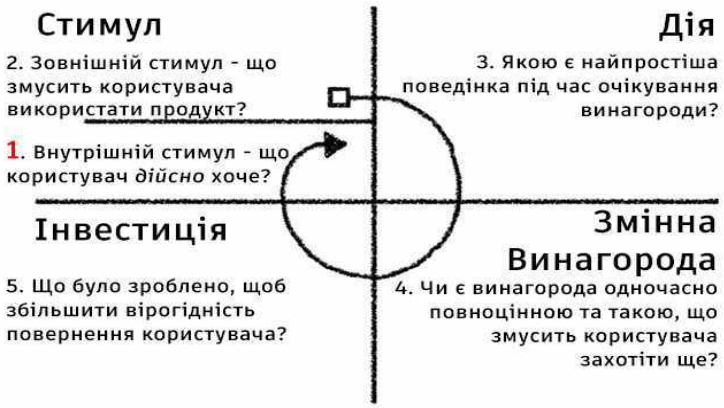


Рисунок 1 – Чотири кроки «Циклу Звички»
Джерело: [1]

1. Стимул (*Trigger*) – це перший крок, який спонукає користувача до початку взаємодії з продуктом. Стимул може бути зовнішнім (зовнішня подія, така як електронний лист, push-сповіщення, реклама, яка надихає користувача відвідати програмний продукт) або внутрішнім (почуття, бажання, потреби, які спонукають користувачів до дій).
2. Дія (*Action*) – це етап, коли користувач виконує дію (наприклад, переглядає контент, використовує різноманітні функції, натискає кнопки), яка веде до взаємодії з програмним.
3. Змінна Винагорода (*Variable Reward*) – крок, коли після дії користувач отримує винагороду (винагорода може бути в різних формах, зокрема, задоволення від користування продуктом, отримання корисної інформації, соціальне визнання, емоційне задоволення тощо).
4. Інвестиція (*Investment*) – це крок, на якому користувач робить інвестицію (надання додаткової інформації, створення акаунту, налаштування чи завантаження контенту в продукт), що підвищує ймовірність повернення та повторного залучення користувача до проєкту (продукту)..

Спираючись на [3], моделлю геймдизайну будемо вважати модель *MDE*, де *M* – механіка гри, *D* – динаміка гри, *E* – емоції (під час гри як результат самого процесу гри). До *M* включають історію, правила і розвиток, які змушують користувачів (гравців) хотіти повторити

свої дії, з урахуванням вже отриманого досвіду та знань. До *D* відносять дії користувачів. Емоції визначають ступінь задоволення від пройденого шляху для досягнення своєї мети [3].

Основними задачами гейміфікації, що використовується в інтелектуальних навчальних системах, зокрема, є:

– *Залучення користувачів*, привертаючи увагу користувачів та зацікавлюючи їх продуктом; завдяки елементам гри, продукт стає більш привабливим, що збільшує кількість нових користувачів, які хочуть здійснити з ним взаємодію.

– *Збереження уваги та утримання користувачів*, створюючи стійку прив'язаність користувачів до продукту; за допомогою елементів гри, продукт стає цікавим та захоплюючим на довгий час, що забезпечує постійне його використання.

– *Мотивація до певної поведінки,* стимулюючи користувачів до виконання певних дій або досягнення певних цілей; зокрема, винагороди, досягнення та рівні надихають користувачів до активної взаємодії з продуктом та досягнення поставлених цілей.

– *Покращення користувальницького досвіду*, роблячи використання продукту більш приємним та таким, що приносить задоволення; винагороди та досягнення підсилюють позитивні емоції від користування продуктом, що збільшує рівень задоволення від «спілкування» з продуктом.

– *Розвиток навичок та вмінь*, стимулюючи користувачів покращувати свої навички та вміння; постійні виклики та винагороди за покращення результаті сприяють розвитку вмінь користувачів та підвищенню ефективності використання ними продукту.

– *Стимулювання соціальної взаємодії*, залучаючи користувачів до співпраці чи конкуренції один з одним; це стимулює соціальну взаємодію, створює спільноти користувачів та збільшує активність їх дій у продукті.

– *Формування звички* у користувачів багато разів повертатись до продукту, що досягається через використання циклу звички та постійного спонукання користувачів до взаємодії з продуктом.

Однією з проблем гейміфікації є дотримання балансу між «фактором веселощів» і тональністю тематики навчального контенту (наприклад, рівнем складності, рівнем важливості, рівнем обов’язковості для подальшого навчального контенту, тощо).

Адаптація gameplay [4] та винагороди стосується саме користувачів (ступінь явної гейміфікації та характер винагород, які підходять для додатку, де змагаються друзі, не підійдуть для корпоративного середовища, яке віддає перевагу більш витонченим підходам).

Використовуючи вебдодатки з елементами гейміфікації, користувачам мають бути забезпечені, зокрема, такі потреби, як:

– *автономність* – дії користувачів повинні бути добровільними; модератори (адміністратори) не повинні підштовхувати їх до бажаної поведінки, а лише надавати елементи/підказки, які вони користувачі можуть знайти самостійно.

– *компетентність* – користувачі мають почуватися комфортно під час знайомства із запропонованим розробниками дизайном (наприклад, багато користувачів зазвичай не люблять читати багато тексту, тоді доцільно використовувати іконки або поступове розкриття інформації [5].

Дизайн вебсайту, зокрема, характеризується тим, що:

– має вплив на продуктивність та ставлення користувачів до програмного продукту, який є online-системою;

– повинен дозволяти користувачам легко і ефективно переглядати різні вебсторінки і гіперпосилання..

Привабливий вебсайт з великою ймовірністю справить позитивне враження, зацікавить користувачів програмним продуктом. Тому важливо визначити уподобання різних категорій потенційних користувачів щодо кольорів вебсторінок, типу і формату тексту, графіки, якості зображень і типу 2D- або 3D зображень, простоти організації та структури вебсторінок і т.і.

Крім того, зручність користування вебсторінкою є важливим фактором легкості взаємодії з навчальним контентом, простоти пошуку, відображення адекватної відповіді (за рівнем

деталізації, рівнем складності, швидкості надання відповідного фрагменту контенту тощо). Зручність використання важлива для оцінювання якості вебсайтів навчальних систем.

При дослідженні крос-культурних і когнітивних аспектів навігації на вебсайтах було виявлено, що вони пов'язані з усіма характеристиками контенту сайту відповідної інформаційної (інтелектуальної) навчальної системи. Характеристики та зміст вебсторінок підтримують інтерес користувачів до всієї системи.[9, 10, 11].

Використання аватару для надання інформації про той чи інший компонент (фрагмент) навчального контенту призводить до збільшення частоти використання вебсайту системи. У [12] вивчалися такі характеристики, як інформація про контент, конфіденційність, дизайн безпеки, якість вебсайту, якість контенту, тип контенту, дизайн вебсайтів.

Було в [12] підтверджено сприйняття користувачів змісту та якості інформації системи (в тому числі й навчального контенту) є лише одним із вимірів якості дизайну вебсайту. Тому дизайн і сприйняття вебсайту слід оцінювати за допомогою моделей з багатьма змінними, які поєднують інші сприйняття користувачів, а не лише інформаційний контент.

Основними елементами геймдизайну [5], які можна використовувати у вебдизайні, зокрема, є:

– *бейджі та досягнення*, це стимулює користувачів до залучення їх «спілкування» з програмним продуктом та мотивує продовжувати взаємодію з контентом;

– *рівні та прогрес*, завдяки цьому користувачі будуть прагнути досягати вищих рівнів, щоб відкривати нові можливості чи отримувати більш цінні нагороди;

– *таблиці лідерів*, які стимулюють користувачів до змаганя та підвищують зацікавленість у зміцненні їхньої позиції в рейтингу;

– *віртуальні винагороди та бонуси* сприяють підвищенню інтересу користувачів до взаємодії з сайтом;

– *гейміфіковані виклики та завдання*, щоб стимулювати користувачів для виконання певних дій на вебсайті (наприклад, запропонувавши їм завдання для отримання бейджа чи віртуальної нагороди);

– *прогресивне розблокування контенту*, яке дозволяє надавати доступ до додаткового контенту або функцій;

– *інтерактивність та графіка* (рухомі елементи, анімації, ілюстрації, тощо), щоб зробити вебсайт більш цікавим та привабливим для користувачів;

– *соціальні функції* (можливість ділитися досягненнями, змагатися з друзями, тощо) сприяють залученості користувачів, створюючи деяку спільноти навколо вебсайту.

При розробці стратегії гейміфікації слід звертати увагу, зокрема, на те, щоб:

– використовувати системи балів лише тоді, коли вони мають сенс і пропонують додаткову цінність (часто бали бувають недостатньо/занадто цінними, якщо недостатньо цінні, то вони втрачають сенс, якщо бали занадто цінні (досягають більшої цінності, ніж та, що була призначена), то це може сприяти збільшенню кількості користувачів, готових обманювати або зламувати систему, щоб отримати бали;

– поява винагород відбувалася у відповідний час, інакше вони можуть негативно впливати на мотивацію відвідувачів вебсайту;

– стратегія гейміфікації відповідала обраній цільовій аудиторії та конкретному бізнесу (зокрема, для дорослої аудиторії не слід використовувати занадто багато «дитячих» елементів гейміфікації [13]).

Розглянемо використання гейміфікації в різних вебдодатках.

Reddit [16] є прикладом вебдодатку соціальної мережі, що використовує різні елементи гейміфікації, зокрема, такі як:

– користувачі отримують бали "карми", які нараховуються через врахування вподобань інших користувачів;

– користувачі можуть дарувати один одному нагороди, які відображаються в окремому пості та в профілі користувача;

– користувачі отримують «трофеї» за певні досягнення (наприклад, кількість років у додатку, виконання певних дій).

Stack Overflow [17] – вебсайт, який є форумом повідомлень, де можна, наприклад, задавати питання, пов'язані з програмуванням і розробкою. Stack Overflow використовує такі методи гейміфікації:

– отримання користувачами балів за їхні запитання/відповіді від інших користувачів (ці бали відображаються як зароблена репутація і корисність відповіді користувача на запитання);

– отримання користувачами нові привілеїв (зокрема, можливість ставити запитання) за відповідні бали репутації;

– присудження значків на зростаючих рівнях репутації.

Вебдодатки соціальних мереж, такі як X (колишній Twitter) [18], Facebook [19], Instagram [20] і TikTok [21], гейміфіковані. Фітнес-трекери, такі як Fitbit [22], Apple Watch [23], включають багато гейміфікації, щоб зробити тренування більш мотивуючими та веселими.

LinkedIn [14] навіть має певну гейміфікацію у вигляді значків навичок. Користувачі оцінюють свої навички, і якщо вони потрапляють у 30% найкращих, то отримують значок, який відображається у їхньому профілі.

Гейміфікація зустрічається навіть у самих ігрових системах. Наприклад, учасники Xbox Game Pass [24] заробляють бали Microsoft Rewards, граючи в ігри, що входять до бібліотеки Xbox Game Pass. Ці бали можна обміняти на такі винагороди, як подарункові картки Xbox, внутрішньоігровий контент, фільми тощо.

Показниками успіху використання гейміфікації у вебдизайні, зокрема, є:

– збільшення часу перегляду сайту до 30%;

– залучений користувач отримує приблизно 23% надбавки прибутковості (незалучені клієнти отримують 13% знижки);

– збільшення кількості коментарів на 13%, соціального обміну на 22%, відкриття контенту на 68%;

– збільшення на 100-150% показників залученості, включаючи унікальні перегляди, перегляди сторінок, активність у спільнотах і час перебування на сайті.

Duolingo [25] використовувала гейміфікацію при вивченні мов, щоб допомогти збільшити свою базу користувачів до 300 мільйонів.

Після впровадження гейміфікації у свій мобільний додаток Foursquare [25] за п'ять років розширився у 10 разів.

Roblox [25] запустила програму Roblox Education, яка допомогла збільшити кількість активних користувачів Roblox до 90 мільйонів.

Autodesk [25] використала гейміфікацію, щоб збільшити рівень використання свого трейлеру на 40%.

Kenco [26] збільшила продажі на 45% після використання гейміфікації продажів.

Ford Motors [26] збільшила продажі на 8 мільйонів доларів за допомогою гейміфікованого контенту.

Coop [27] побачила збільшення витрат на 39% серед клієнтів, які були залученими до її системи гейміфікації.

У освітньому процесі також використовуються принципи гейміфікації. Елементи гри присутні у впровадженні контрольних робіт та екзаменів, фінальних тестувань, однак вони не завжди є дієвими.

Гейміфікація процесів навчання – ефективний спосіб утримати увагу та підвищити мотивацію. Найчастіше гейміфікація використовується в точних та природничих науках (наприклад, математика, хімія). Наприклад, після впровадження математичних ігор у навчальний процес в Університеті Флориди, студенти не лише підвищили успішність, але й переосмислили для себе предмет. А деякі з них навіть зізналися, що побороли фобію математики.

Гейміфікація здатна полегшити вивчення іноземних мов. Гейміфіковані формати спрощують запам'ятовування нового матеріалу. Найпростішими способами гейміфікації у вивченні іноземної мови online і off-line є флешкартки та вікторини.

В [15] відзначається, що найцінніший потенціал ігрового навчання полягає у допомозі студентам бачити завдання, тему або модель в контексті – як частину системи. На відміну від інших підходів та методик навчання, використання гейміфікації надають студентам можливість бачити об'єкти предметної області, що вивчається, зі зв'язками з іншими об'єктами. Крім того для студентів є важливим психологічний стан (наприклад, позитивні емоції, які вони відчувають під час гри), стосунки між учасниками гри, зворотній зв'язок.

Розглянемо деякі сучасні online-ресурси гейміфікафіції навчального процесу.

Classcraft (рис. 2) [28] – online-платформа для навчання, яка створює ігрову атмосферу, підвищує мотивацію студентів і залученість до навчального процесу. У Classcraft кожен студент створює свого аватара, який може розвиватись в процесі навчання. Викладач надає різні завдання (наприклад, виконання практичної роботи, відповідь на запитання, допомога одногрупникам), які дають можливість студентам заробляти додаткові очки, досвід та інші нагороди. Всі персональні дані в Classcraft є конфіденційними.

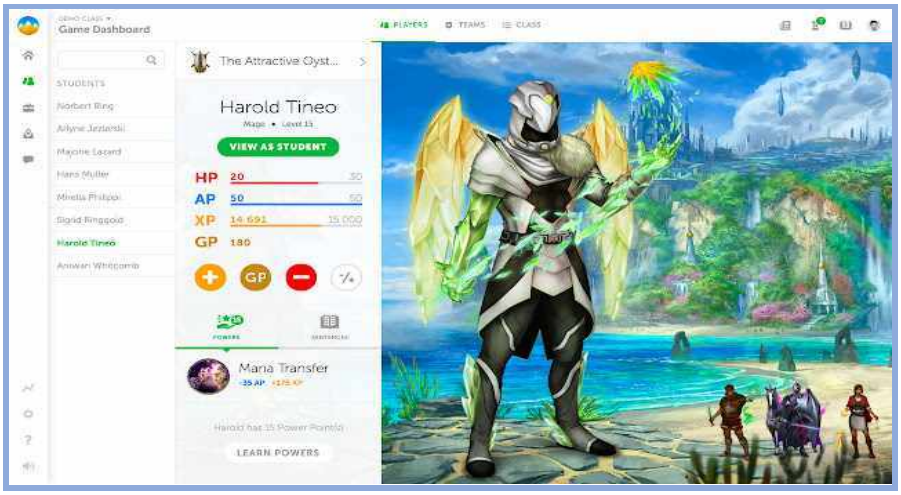


Рисунок 2 – Інтерфейс Classcraft
Джерело: [28]

iLearn (рис. 3) [29] – інноваційна платформа для навчання, яка містить широкий спектр навчальних ресурсів, які допомагають отримувати знання в ефективній та захоплюючій формі.

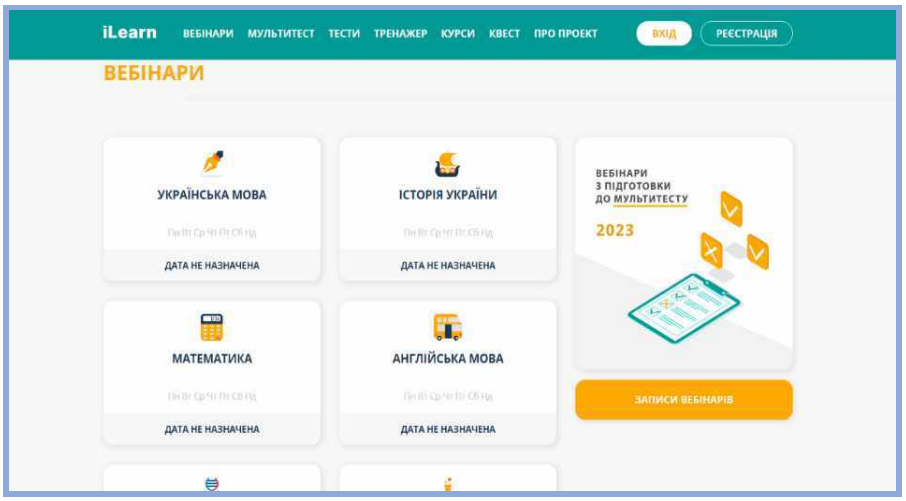


Рисунок 3 – Головна сторінка iLearn

Джерело: [29]

Kahoot (рис. 4) [30] – веб-орієнтована система гри-базованого навчання, що дозволяє створювати, досліджувати та грати в одну з широкого спектру навчальних ігор. Kahoots – це ігри та виклики, які користувачі можуть створити за допомогою наявних різноманітних інструментів.

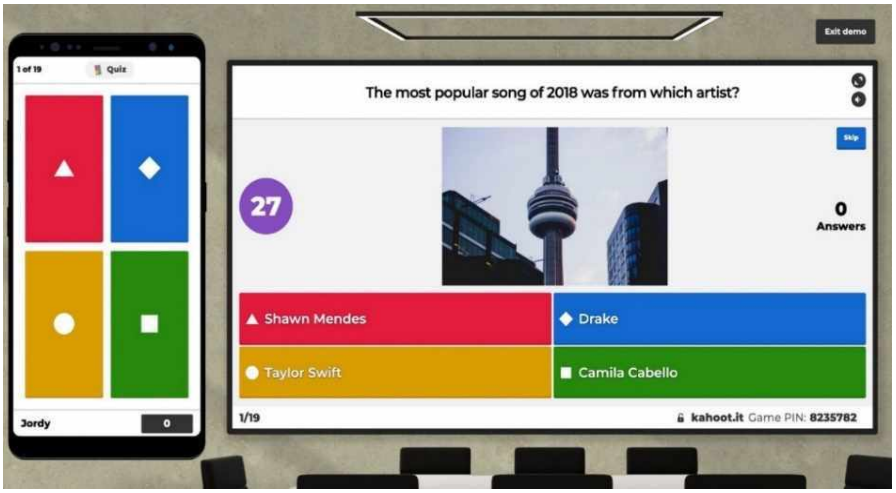


Рисунок 4 – Інтерфейс Kahoot
Джерело: [30]

Gimkit (рис. 5) [31] є додатком типу «ігрове шоу». Викладачі, створюючи класи, запрошують студентів до навчання, створюють та діляться гральними квізами (так званими «kits»). Ігри Gimkit підтримують індивідуальний та командний режими, підвищують зацікавленість та мотивацію студентів, надаючи їм різні стимули (наприклад, віртуальні гроші за правильні відповід, для купівлі підсилювачів чи ігрових предметів. Після завершення гри в Gimkit автоматично оцінюються відповіді студентів, а викладач отримує детальний звіт про успішністьяк всієї групи, так і окремих студентів.

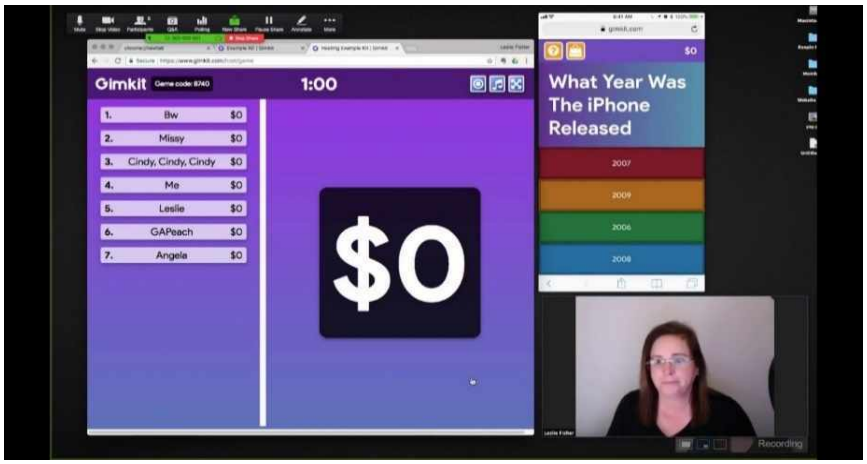


Рисунок 5 – Інтерфейси Gimkit
Джерело: [31]

Quizizz (рис. 6) [32] – інструмент навчання з елементами гейміфікації, який викладачі можуть використовувати для залучення студентів до навчального процесу. Використовуючи Quizizz, викладачі можуть створити власні тести, вбудовуючи різні типи питань (багатовибірні, відкриті, опитування, заповнення пропусків тощо) та медіа-матеріали (зображення, відео, аудіо- та голосові записи. Бібліотека Quizizz містить багато готових тестів та навчального контенту з різних предметів та рівнів складності. Викладачі можуть адаптувати наявний навчальний контент для вирішення своїх проблем.

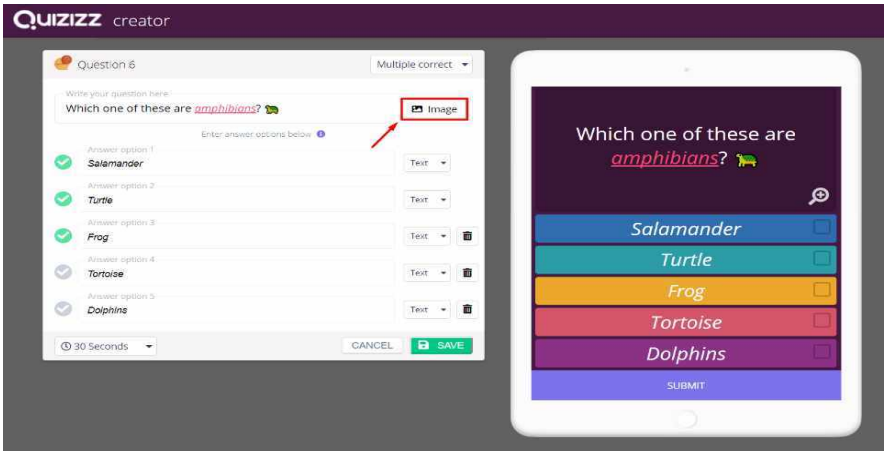


Рисунок 6 – Створення тестів у Quizizz
Джерело: [32]

Blooket (рис. 7) [33] – платформа для навчання на основі гри, яка дозволяє створювати освітні ігри. Викладачі можуть використовувати створені ігри як практичне завдання для гри студентів у власному темпі, створювати власні набори питань чи використовувати готові. Наявність облікового запису дозволяє студентам «відстежувати» свої статистичні дані, розміщувати свої результати в рейтингу глобального лідера, купувати та продавати так звані blooks та брати участь у майбутніх подіях для всієї спільноти".

Blooket працює просто: вчителі проводять живі ігри з унікальним режимом гри на своєму екрані, а учні приєднуються до гри, використовуючи згенерований ідентифікаційний номер. Викладачі також мають можливість призначати ігри як навчальні завдання, щоб учні могли працювати з ними у власному темпі.

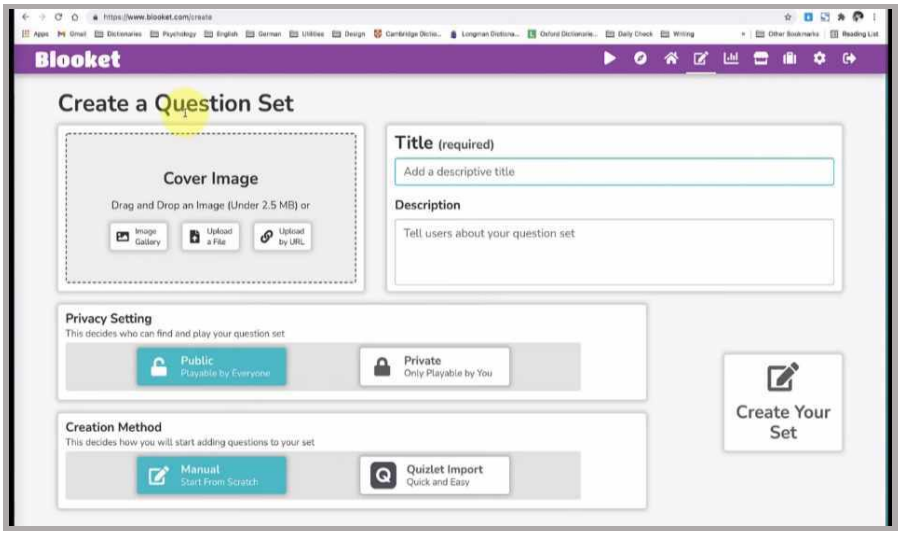


Рисунок 7 – Створення тестів у Blooket

Джерело: [33]

Riddle (рис. 8) [34] –генератор тестів, який дозволяє створювати різноманітні тести та опитування. Викладачі можуть використовувати готові шаблони тестів або створювати свій власний тест з нуля. У тестах Riddle можна включати різні мультимедійні матеріали (відео, аудіо-кліпи, зображення, GIF-файли, відеокліпи MP4, тощо).

Riddle при проходженні аудиторією тестів генерує звіти, що дозволяють отримати доступ до даних про навчальний процес (зокрема, процес тестування).

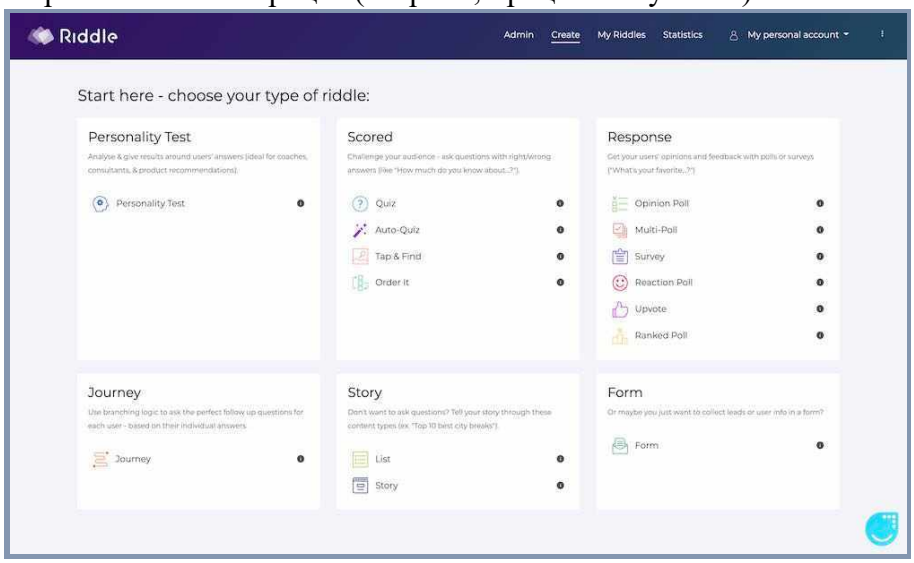


Рисунок 8 – Створення тестів у Riddle

Джерело: [34]

Попри очевидні переваги гейміфікації навчання, існує ряд проблем, що призводять до помилок та знижують ефективність цього підходу. До таких проблем можна, зокрема, віднести:

–*брак конкретики*, в той час, як для формулювання мети необхідні креативність, логіка, без яких навіть найкращий задум не буде успішним;

–недосліджена аудиторія інформаційних систем з елементами гейміфікації (створення сприятливого для гейміфікації простору вимагає чіткого розуміння установок і цінностей цільової групи, бо від цього залежить дизайн системи та метод інтеракції);

–некоректність при оцінюванні (обираючи гейміфікацію слід спланувати, який рівень знань і вмінь студенти мають продемонструвати наприкінці курсу), бо, незважаючи на те, що більшість навчальних систем, що використовують ігри, має вбудоване відстеження прогресу студентів, слід контролювати якість здобутих знань;

–зміщення фокусу з навчання на гру, бо слід нагадувати студентам, що гра відбувається заради навчання, а не навпаки.

Висновки. Проведений аналіз проблем, задач та інших аспектів використання гейміфікації в інтелектуальних (інформаційних з елементами інтелектуалізації) навчальних системах та їхньому вебдизайні обумовив наступні висновки:

–гейміфікація – це інструмент, який допомагає користувачам (студентам, курсантам, тощо) підвищити рівень своїх мотивації та зацікавленості до online-навчання в системах з гейсіфікованим веьдизайном;

–гейміфікація сприяє емоційній залученості та соціальній взаємодії між користувачами одних і тих самих навчальних спільнот

–гейміфікація сприяє покращенню вебдизайну та створенню цікавого геймдизайну, що, в подальшому, обумовлює подальше залучення користувачів до навчання в таких системах;

–інтелектуальна навчальна система з елементами гейміфікації стає цікавою незалежно від категорії користувача (студента, який прагне покращити свої оцінки з навчального курсу чи теми, або викладачем, який шукає цікавий і захоплюючий спосіб навчання для своїх студентів);

–спроєктуваний ігровий вебдизайн часто є значно цікавішим і тому саме під час ігрового процесу взаємодія користувачів з системою і стає більш захопливою та з мінімальним стресовим навантаженням завдяки використанню елементів гейміфікації у відповідних інтелектуальних навчальних системах;

Успішне впровадження інтелектуальної навчальної системи з елементами гейміфікації та відповідним ігровим вебдизайном надасть навчально-пізнавальній діяльності студентів імпульс до творчості, сприятиме підвищенню якості освітнього процесу, а також інтеграції цієї системи до багатьох сучасних інформаційних навчальних систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koster R. Theory of Fun for Game Design: second edition. O'Reilly Media, 2013. 300 p.
2. Eyal N., Hoover R. Hooked: How To Build Habit-Forming Products. Portfolio, 2014. 256 p.
3. Robson K., Plangger K., Kietzmann J., McCarthy I., Pitt L. Is it all a game? Understanding the principles of gamification. Business Horizons. Elseveir, 2015. 10 p.
4. Zichermann G., Linder J. Game Based Marketing: Inspire Customer Loyalty Through Rewards, Challenges and Contests. John Wiley & Sons, 2010. 240 p.
5. Ganguly B., Dash S., Cyr D., Head M. The effects of web site design on purchase intention in online shopping: the mediating role of trust and the moderating role of culture. // International Journal Electronic Business, 2010. 8(4). P. 302-330.
6. Nielsen J., Tahir M. Homepage usability: 50 websites deconstructed. Indianapolis: New Riders Publishing, 2012. 315 p.
7. Aladwani A.M., Palvia P.C. Developing and validating an instrument for measuring user-perceived Web quality.// Information & Management, 2012. 39(6). P. 467-476.
8. Barnes S. J., Vidgen, R.T. An Evaluation of Cyber-Bookshops: The WebQual Method.// International Journal of Electronic Commerce, 2011. 6(1). P. 11-30.
9. Dholakia U.M., Rego L.L. What makes commercial Web pages popular? // European Journal of Marketing, 2008. 32(7-8). P. 724-736.
10. Robbins S.S., Stylianou A.C. Global corporate Websites: an empirical investigation of content and Design. // Information & Management, 2013. 40(3). P. 205-212.
11. Palmer J.W. Website usability, Design, and performance metrics. //Information Systems Research, 2012. 13(2). P. 151-167.
12. Holzwarth M., Janiszewski C., Neumann M. The Influence of Avatars on online Consumer Shopping Behavior. //Journal of Marketing, 2016. 70. P. 19–36.
13. Cao M., Zhang Q., Seydel JB2C e-commerce website quality: an empirical examination. //Industrial Management and Data Systems, 2015. 105. P. 645-661.
14. How to Use LinkedIn Effectively – Getting the Best. URL: https://www.mindtools.com/am8a1fv/how-to-use-linkedin-effectively
15. Shapiro J. FREEPLAY: A Video Game Guide to Maximum Euphoric Bliss. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. 172 p.
16. Reddit. URL: https://www.reddit.com
17. Stack Overflow. URL: https://stackoverflow.com
18. X (Twitter). URL: https://twitter.com
19. Facebook. URL: https://www.facebook.com
20. Instagram. URL: https://www.instagram.com
21. TikTok. URL: https://www.tiktok.com
22. Fitbit Official Site for Activity Trackers & More. URL: https://www.fitbit.com/global/us/home
23. Apple – Watch. URL: https://www.apple.com/watch/
24. Join Xbox Game Pass: Discover Your Next Favorite Game. URL: https://www.xbox.com/en-US/xbox-game-pass
25. 5 Stats That Prove Gamification Boosts Retention. URL: https://www.storyly.io/post/5-stats-that-prove-gamification-boosts-retention
26. How You Win Big With Gamification in Marketing. URL: https://optinmonster.com/gamification-in-marketing/

27. The power of gamification in marketing for businesses. URL: https://www.thedrum.com/profile/playable/news/the-power-of-gamification-in-marketing-for-businesses
28. Classcraft. URL: https://www.classcraft.com
29. iLearn. URL: https://ilearn.org.ua
30. Kahoot. URL: https://kahoot.com
31. Gimkit. URL: https://www.gimkit.com
32. Quizizz. URL: https://quizizz.com/?lng=en
33. Blooket. URL: https://www.blooket.com
34. Riddle. URL: https://www.riddle.com

REFERENCES

1. Koster R. (2013). Theory of Fun for Game Design: second edition. O'Reilly Media. 300 p.
2. Eyal N., Hoover R. (2014). Hooked: How To Build Habit-Forming Products. Portfolio. 256 p.
3. Robson K., Plangger K., Kietzmann J., McCarthy I., Pitt L. (2015). Is it all a game? Understanding the principles of gamification. Business Horizons. Elseveir. 10 p.
4. Zichermann G., Linder J. (2010). Game Based Marketing: Inspire Customer Loyalty Through Rewards, Challenges and Contests. John Wiley & Sons. 240 p.
5. Ganguly B., Dash S., Cyr D., Head M. (2010). The effects of web site design on purchase intention in online shopping: the mediating role of trust and the moderating role of culture. // International Journal Electronic Business. 8(4). P. 302-330.
6. Nielsen J., Tahir M. (2012). Homepage usability: 50 websites deconstructed. Indianapolis: New Riders Publishing. 315 p.
7. Aladwani A.M., Palvia P.C. (2012). Developing and validating an instrument for measuring user-perceived Web quality.// Information & Management. 39(6). P. 467-476.
8. Barnes S. J., Vidgen, R.T. (2011). An Evaluation of Cyber-Bookshops: The WebQual Method.// International Journal of Electronic Commerce. 6(1). P. 11-30.
9. Dholakia U.M., Rego L.L. (2008). What makes commercial Web pages popular? // European Journal of Marketing. 32(7-8). P. 724-736.
10. Robbins S.S., Stylianou A.C. (2013). Global corporate Websites: an empirical investigation of content and Design. // Information & Management. 40(3). P. 205-212.
11. Palmer J.W. (2012). Website usability, Design, and performance metrics. //Information Systems Research. 13(2). P. 151-167.
12. Holzwarth M., Janiszewski C., Neumann M. (2016). The Influence of Avatars on online Consumer Shopping Behavior. //Journal of Marketing. 70. P. 19–36.
13. Cao M., Zhang Q., Seydel (2015). JB2C e-commerce website quality: an empirical examination. //Industrial Management and Data Systems. 105. P. 645-661.
14. How to Use LinkedIn Effectively – Getting the Best. URL: https://www.mindtools.com/am8a1fv/how-to-use-linkedin-effectively
15. Shapiro J. (2012). FREEPLAY: A Video Game Guide to Maximum Euphoric Bliss. CreateSpace Independent Publishing Platform. 172 p.
16. Reddit. URL: https://www.reddit.com
17. Stack Overflow. URL: https://stackoverflow.com
18. X (Twitter). URL: https://twitter.com
19. Facebook. URL: https://www.facebook.com
20. Instagram. URL: https://www.instagram.com
21. TikTok. URL: https://www.tiktok.com
22. Fitbit Official Site for Activity Trackers & More. URL: https://www.fitbit.com/global/us/home
23. Apple – Watch. URL: https://www.apple.com/watch/

24. Join Xbox Game Pass: Discover Your Next Favorite Game. URL: https://www.xbox.com/en-US/xbox-game-pass
25. 5 Stats That Prove Gamification Boosts Retention. URL: https://www.storyly.io/post/5-stats-that-prove-gamification-boosts-retention
26. How You Win Big With Gamification in Marketing. URL: https://optinmonster.com/gamification-in-marketing/
27. The power of gamification in marketing for businesses. URL: https://www.thedrum.com/profile/playable/news/the-power-of-gamification-in-marketing-for-businesses
28. Classcraft. URL: https://www.classcraft.com
29. iLearn. URL: https://ilearn.org.ua
30. Kahoot. URL: https://kahoot.com
31. Gimkit. URL: https://www.gimkit.com
32. Quizizz. URL: https://quizizz.com/?lng=en
33. Blooket. URL: https://www.blooket.com
34. Riddle. URL: https://www.riddle.com

Tkachenko K.O., Isachenko B.O.

USE OF GAMIFICATION IN INTELLIGENT EDUCATIONAL SYSTEMS AND THEIR WEB DESIGN

The problems of informatization and intellectualization of learning processes with the use of the latest technologies are considered on the example of the development of informational (with elements of intellectualization) educational systems that use gamification both in education and in the development of the corresponding web design of the system.

Nowadays, gamification is an innovative approach that turns ordinary (sometimes routine and uninteresting) tasks and learning processes into exciting games. The article examines the essence of this approach, which is becoming more and more widespread and successful not only in the field of entertainment, but also in education. It is noted that the use of gamification in informational (with elements of intellectualization) educational systems causes an increase in the influence on educational processes and the design of their interface subsystems (in web-oriented systems - on web design), ensuring a high level of user involvement and improving the convenience of their work in educational online environment.

Some aspects, stages and principles of web design development of informational educational systems functioning in the conditions of online education are analyzed. The main tasks of gamification, which is used in intelligent educational systems, are defined, in particular, such as attracting users; maintaining the attention and retention of users; motivation for certain behavior; improving the user experience by making the use of the product more pleasant and satisfying; development of skills and abilities; stimulation of social interaction.

It is noted that game learning contributes to the understanding of tasks, topics, educational content as part of the system. The use of gamification provides an opportunity to see objects of the subject area being studied with connections to other objects. In addition, the psychological state of users (for example, the positive emotions they feel during the game), the relationship between the game participants, and feedback are important.

The article considers the importance and advantages of gamification in web design, highlights the main concepts, key principles of its implementation, and analyzes the impact on users. Gamified websites of the most common modern informational educational systems are also considered.

***Keywords**: information system, intellectual system, information (with elements of intellectualization) educational system, educational process, gamification, web design, game design, website, dynamic interactive interface.*

Водний транспорт № 2 (38) 2023

УДК 004.9, 004.48, 004 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.33

Ткаченко О.І., Шиян Я.А.

МОДЕЛЮВАННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ: ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД

Розглянуто проблематику моделювання складних систем на прикладі моделювання маркетингової діяльності, в цілому, та маркетингових досліджень і маркетингового управління, зокрема. Проаналізовано деякі аспекти, етапи та принципи моделювання маркетингової діяльності та різних її сфер. Визначено основні вимоги до засобів моделювання маркетингових досліджень та маркетингового управління для вирішення широкого кола теоретичних і практичних проблем маркетингової діяльності та окремих її сфер. Шляхом вирішення проблем було обрано моделювання на основі онтологічного підходу (аналізу та відповідної класифікації елементів такої моделі).

Онтологічний підхід ґрунтується на розумінні онтології як деякої універсальної форми подання знань. Онтологія є ефективним засобом для моделювання різних предметних областей, об'єктів, процесів та інформаційних ресурсів. Онтологічне моделювання предметної області «Маркетингова діяльність» сприятиме вирішенню практичних і теоретичних задач завдяки враховуванню факторів, що впливають на різні рівні онтологічної моделі та її елементів.

Наведено основні положення та інструментарій побудови онтології метарівня для визначення концептуальної онтологічної моделі предметної області, що розглядається. Інструментарієм є мова опису онтологій OWL та редактор онтологій Protégé.

У ході дослідження було обґрунтовано доцільність застосування онтологічного моделювання як методу, здатного відобразити таку складну предметну область, як «Маркетингова діяльність» на макрорівні. Було розвинуто методологію онтологічного моделювання маркетингових понять на макрорівні. Розроблена онтологічна модель предметної області «Маркетингова діяльність» може бути використана для оптимізації структури маркетингу конкретного підприємства (при реалізації його можливостей у повному обсязі та у конкретних умовах), а також для оцінки ефективності маркетингових досліджень та маркетингового управління. Запропонована онтологічна модель є динамічною моделлю відповідно до принципів логіки підвищення глибини охоплення суміжних понять, обліку залежностей та закономірностей.

Ключові слова: *онтологія, онтологічна модель, маркетингова діяльність, маркетингові дослідження, маркетингове управління, предметна область, OWL, Protégé, онтограф.*

Вступ. Маркетингові принципи управління підприємствами широко використовуються в розвинених країнах. Маркетингове управління в наш час дозволяє ефективно вирішувати багато проблем вітчизняного бізнесу, узгодити цілі підприємства не тільки з інтересами споживачів його продукції, але й з інтересами всього суспільства, забезпечити гармонічний розвиток всієї економіки країни. Однак практичне використання принципів маркетингу для управління підприємствами в наш час стикається з проблемами системного підходу до опису як предметної області («Маркетингова діяльність»), так і процесів, які в ній проходять. Це робить актуальним пошук сучасних методів і моделей предметної області для дослідження маркетингу як системи управління.

Під маркетинговим управлінням розуміється комплекс організаційно-економічних,

інформаційних і виробничих заходів, спрямованих на досягнення поставлених перед підприємством цілей шляхом застосування маркетингових принципів [1].

Маркетингове управління – складна динамічна система, яка характеризується безліччю різноманітних процесів, наявністю зв’язків між її компонентами. Маркетингове управління передбачає наявність інформаційного процесу, в якому здійснюється збір, накопичення, аналіз даних і розробка на їх основі керуючих впливів на виробничу, збутову та іншу діяльність, що забезпечує досягнення поставлених цілей підприємства [2].

Розробка керуючих дій в системі маркетингового управління опирається на інформацію про результати досліджень ринку, маркетингового середовища та інших об'єктів, дані про які необхідні для вирішення широкого спектру проблем функціонування і розвитку як окремого підприємства, так і окремої галузі або суспільства в цілому.

Для дослідження маркетингових інформаційних процесів доцільно використовувати методи моделювання, які в останні роки досить широко стали застосовуватися в різноманітних економічних дослідженнях [3, 4].

Онтологічне моделювання є інноваційним підходом, який забезпечує підприємствам нові можливості переходу на більш високий і ефективний рівень управління їх діяльністю.

Тому актуальність проблематики аналізу впливу результатів маркетингових досліджень на поведінку споживачів і діяльність підприємств, реалізована у відповідних правових маркетингових інформаційних системах, що засновані на онтологічному моделюванні предметної області, не викликає сумнівів.

Постановка проблеми. Більшість досліджень онтологічного моделювання маркетингу розглядається на мікрорівні (на рівні окремих компонентів системи маркетингу країни). Наприклад, робота зі створення довідкової онтології [5] цікава як приклад максимально повного обліку зв'язків у рамках маркетингових взаємодій, що розглядаються.

Таким чином, спостерігається інтерес до економічних та маркетингових онтологій, проте вони не охоплюють всю економічну систему країни, здебільшого фокусуючись на онтологічному поданні деяких предметних областей. Також дослідження в галузі онтологічного моделювання ведуться на рівні обґрунтування застосування різних теорій та підходів до побудови подібних онтологій. Проблеми, пов'язані з побудовою онтологій маркетингу на макрорівні, є актуальними та потребують свого розгляду та вирішення.

У статті буде розглянуто важливість та переваги онтологічного моделювання в такій предметній галузі, як маркетинг, виокремлено основні поняття, ключові принципи його впровадження та проаналізовано вплив маркетингових досліджень на споживача.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні основи моделювання складних систем (у тому числі економічних) розглядалися такими вченими, як Рогушина Ю.В., Гладун А.Я. [6], Ткаченко К.О. [7], Лаврищева К.М. [8], Бернерс-Лі Т.Дж. [9]. У роботі [10] представлено комплексний аналіз досліджень із онтологічного моделювання. Особливо слід відзначити роботу з осмислення економічних онтологій [11], у якій автор проводить дослідження різних аспектів побудови онтології економіки, розрізняючи онтологію науки та онтологію економічного життя.

Аналіз досліджень з онтологічного моделювання показує, що вони, в основному, спрямовані на створення онтологій організацій та підприємств, як, наприклад, онтологічне моделювання предметної галузі закладу професійної освіти [12], різнорідних предметних знань в інтелектуальних навчальних системах [7, 13], деяких проблем, наприклад, туристичного бізнесу, онтологічного моделювання маркетингової діяльності на основі використання ігрового компонента [14 -16]. В [1, 3] описані економічні категорії та закони, які забезпечують умови для об'єктивного вирішення проблеми про відповідність уявлення індивідів щодо певної категорії онтології. У [12] наведено результати аналізу різних концепцій онтології, введено поняття «онтологічний тест» і показано його корисність для порівняння моделей соціальних, економічних та просторових систем.

В [11] запропоновано підхід до автоматизації процесів класифікації документів як в економіці загалом, так і маркетингу зокрема. Сформована бібліотека містить документи, які були класифіковані за допомогою онтології та методів аналізу тексту. Велика увага онтологічного моделювання економіки приділяється у [12, 19]. Наводиться обгрунтування того, що онтологічне моделювання відіграє важливу роль у розумінні економіки (і маркетингу зокрема) як складної системи.

Мета дослідження. Основною метою роботи є створення комплексної інтегрованої моделі маркетингових досліджень (у тому числі попиту та пропозицій товарів та/або товарних послуг) та вплив результатів проведених досліджень на поведінку різних категорій споживачів у контексті економіки України на макрорівні на основі системних уявлень про об'єкт.

Модель має бути здатною відобразити весь спектр взаємозв'язків та взаємозалежностей між поняттями аналізованої предметної області.

Основний матеріал дослідження. У традиційних методах моделювання є невідповідність між об'єктом та його моделлю, оскільки такі моделі спрощують (іноді й суттєво) уявлення про дійсність. Так, математичні моделі припускають використання різного роду обмежень. Досвід успішного моделювання різноманітних процесів свідчить про те, що прототипами для багатьох моделей були не конкретні сфери реального світу, а їх системні уявлення (результати їх опису у вигляді систем за допомогою різноманітних системоутворюючих ознак).

Розглянута предметна область – «Маркетингова діяльність» (та окремі її сфери, зокрема, такі як маркетингові дослідження, маркетингове управління) – сфера вивчення попиту та споживання тих чи інших категорій товарів різними категоріями споживачів (визначаються, наприклад, за віковими критеріями, гендерною приналежністю, місцем (регіоном) проживання, рівнем освіти, сферою професійної) діяльності, релігійної власності, культурного рівня, рівня матеріального благополуччя тощо.).

Ця область слабо формалізована. Її системне уявлення необхідно налаштовувати, оперативно змінюючи структуру, додаючи та видаляючи зв'язки й елементи при накопиченні інформації про предметну область.

Розроблена комплексна інтегрована модель маркетингових досліджень може бути надалі використана при проєктуванні та розробці відповідної маркетингової інформаційної маркетингової системи. Для моделювання предметної області у цій роботі було обрано онтологію.

У класичних інформаційних маркетингових системах в якості інформаційної бази найчастіше використовується реляційна база даних. Онтологічний підхід до моделювання предметної галузі надає якісно нові можливості.

Онтології широко використовуються для гнучкої інтеграції даних, за якої дані з різних джерел відображаються у відповідній структурі онтології [17, 18].

На основі онтології будується база знань, яка (на відміну від бази даних) містить у собі не лише фактичну інформацію, а й правила виведення нових знань (отримання висновку), що дозволяють автоматично генерувати деякі рішення (робити висновки, робити автоматичні умовиводи про вже існуючі чи нові факти) та здійснювати семантичну обробку інформації.

Використання онтологій (онтологічних моделей) робить можливим пошук на основі понять і зв'язків між ними, що містяться в онтології. Перелічені можливості допомагають більш ефективно збирати та використовувати дані в інформаційній маркетинговій системі.

В наш час існує багато підходів до моделювання тих чи інших маркетингових процесів (використання, наприклад графових, ієрархічних, мережевих чи продукційних моделей). Перевагою онтологічного моделювання є можливість обробляти тексти, що надаються живою (хоча й обмеженою) професійною мовою, тобто здійснювати пошук і обробку не лише структурованої, а й неструктурованої інформації. Обробка тексту, представленого такою слабо формалізованою мовою, в автоматичному режимі можлива за наявності докладного опису предметної області з виявленням великої кількості зв'язків (зокрема, логічних та існуючих між поняттями) [19].

Застосування онтологічного моделювання прискорює процес аналізу та пошуку шляхів оптимального управління підприємствами, дозволяє отримати нову інформацію про їхню структуру, функції та поведінку. Структурні моделі враховують структуру і основні зв'язки між складовими частинами системи, що моделюється. Моделі поведінки відображають розвиток систем як наслідок процесів, що відбуваються в них. Об'єктом функціональних моделей є зв'язки, які формуються всередині та між підсистемою, що моделюється, та іншими підсистемами повної системи (з точки зору функціонування підприємства).

Процес маркетингового дослідження з наступною генерацією рішень щодо маркетингового управління передбачає виконання, зокрема, таких дій:

– вибір типу моделі (замкнута, розімкнена);

– формування структурної та функціональної моделі процесу маркетингового дослідження;

– формування моделі процесу генерації рішень з маркетингового управління (з урахуванням результатів попередньо проведеного маркетингового дослідження);

– побудова онтологічної макромоделі маркетингового дослідження;

– побудова онтологічних моделей підсистем маркетингового дослідження;

– побудова онтологічних моделей підсистем маркетингового управління.

Розімкнута модель маркетингового управління має такі особливості:

– облік вимог до параметрів товару T_i (множина $P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, ..., P_{ik}\}$, де k – загальна кількість параметрів товару T_i);

– генерація множини впливів $Fj = \{F_{j1}, F_{j2}, ..., F_{jn}\}$ на об'єкт управління OM_j (виробничої та ринкової діяльності) з метою досягнення поставлених цілей, n – загальна кількість впливів на j-ий об’єкт управління OM_j;

– параметри товару $P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, ..., P_{ik}\}$ не контролюються і не використовуються для корекції управління.

Розімкнута модель використовувалася на початку розвитку маркетингу. Суттєвим недоліком таких моделей була їхня низька ефективність, обумовлена відсутністю зворотних зв'язків і складністю контролю результатів управління. Ця система немає можливості оптимізації показника ефективності.

Замкнута модель усуває ці недоліки. Вихідні параметри товару $P_i^* = \{P_{i1}^*, P_{i2}^*, ..., P_{ik}^*\}$ враховуються при маркетингових дослідженнях і як зворотний зв'язок використовуються при генерації рішень щодо маркетингового управління, що надає можливість при управлінні виробництвом враховувати відхилення вихідних параметрів продукції від існуючих вимог споживачів.

Включення в систему маркетингового управління зворотного зв'язку дозволяє оптимізувати управління, контроль та ухвалення рішення. У цьому випадку оптимізація може здійснюватися шляхом корекції множини $Fj = \{F_{j1}, F_{j2}, ..., F_{jn}\}$.

Комплекс маркетингової діяльності можна розділити, зокрема, такі групи [4 – 6]:

– product (товар);

– price (ціна);

– place (ринок);

– promotion (просування товарів).

Маркетингова діяльність ґрунтується на маркетингових дослідженнях, зборі, аналізі, накопиченні інформації, а також управлінні. При моделюванні маркетингової діяльності можна виділити такі напрями досліджень (які відображаються в онтології макрорівня):

– *Управління маркетингом* – вирішення проблем управління та контролю маркетингової діяльності підприємства, координації роботи структурних підрозділів підприємства, їх націленості на споживача.

– *Маркетингові дослідження* – збір та аналіз різноманітної маркетингової інформації для обґрунтування маркетингових рішень.

– *Управління товаром* – комплекс маркетингових заходів щодо забезпечення

конкурентоспроможності продукції, що випускається, та вирішення інших, пов'язаних з цим, проблем.

– *Управління роботою на ринку*, оскільки маркетингова діяльність підприємства протікає на ринку, при цьому, зокрема, оцінюється рівень попиту на продукцію, вимоги споживачів до параметрів товару, вибираються сегменти ринку.

– *Управління ціноутворенням* – визначення стратегії ціноутворення та встановлення ціни на продукцію підприємства (з урахуванням, наприклад, їхньої споживчої цінності, попиту та пропозиції на ринку, витрат виробництва, поведінки конкурентів, узгодження цілей підприємства).

– *Управління просуванням (товару)* – формування ефективних каналів розподілу товарів підприємства, створення реклами, розробка заходів щодо формування попиту та стимулювання збуту.

– *Управління зв'язків із громадськістю* (Public Relations, PR, паблік рілейшенз) – забезпечення зв'язків з іншими організаціями, формування позитивного іміджу підприємства.

– *Міжнародний маркетинг* займається проблемами зовнішньоекономічної діяльності.

Формальна модель онтології маркетингових досліджень може бути описана таким чином:

$$O = <L, C, F, G, H, R, A>,$$

де $L = L^C \, U \, L^R$ – словник онтології, що містить множину лексичних одиниць для маркетингових понять L^C та множину одиниць для відношень L^R; C – множина маркетингових понять онтології, причому для кожного поняття $c \in C$ в онтології існує принаймні одне твердження; F та G – функції посилань такі, що

$$F: F^{LC} \rightarrow 2^C \text{ та } G: F^{LR} \rightarrow 2^R.$$

F і G пов'язують множини лексичних одиниць $\{L_{jj}\} \subset L^C$ з множинами маркетингових понять і відношень, якими вони зв'язуються відповідно до даної онтології. При цьому одна лексична одиниця може відноситися до кількох понять або відношень і одне поняття або відношення може посилатися на декілька елементів множини L.

Інверсіями функцій посилань є F^{-1} та G^{-1}; H – фіксує таксономічний характер відношень (зв'язків), у якому поняття онтології пов'язані нерефлексивними, ациклическими, транзитивними відношеннями $H \subset C$ x C.

$H (C_1, C_2)$ означає, що поняття C_1 є підпоняттям C_2; R означає бінарний характер відносин між поняттями онтології, що фіксують пари:

<область застосування (*domain*), область значень (*range*)>,

тобто пари $(D\ R)$ з D, $R \in C$; A – набір аксіом онтології.

Відмінною особливістю реалізації маркетингових досліджень є метод створення онтології, що ґрунтується на використанні контрольованої (професійно обмеженої) природної мови, яка розробляється як мова подання знань для проведення маркетингових досліджень (зокрема, анкетування споживачів, їх опитування, формування управлінських рішень тощо).

Ця мова утворюється шляхом обмеження граматики, термінології та мовних зворотів для предметної області «Маркетингова діяльність», що розглядається. Встановлені на мову обмеження призначені для усунення неоднозначності/багатозначності природної мови. При цьому ключові маркетингові поняття та зв'язки відображаються у вигляді:

<суб'єкт – предикат – об'єкт>.

У редакторі онтологій Protégé [21, 22] реалізовано можливість експорту та імпорту онтологій у стандартних форматах опису (OWL [22, 23], RDF [24]).

На рис. 1 приведено графічне відображення моделі (на метарівні) предметної області «Маркетингова діяльність».

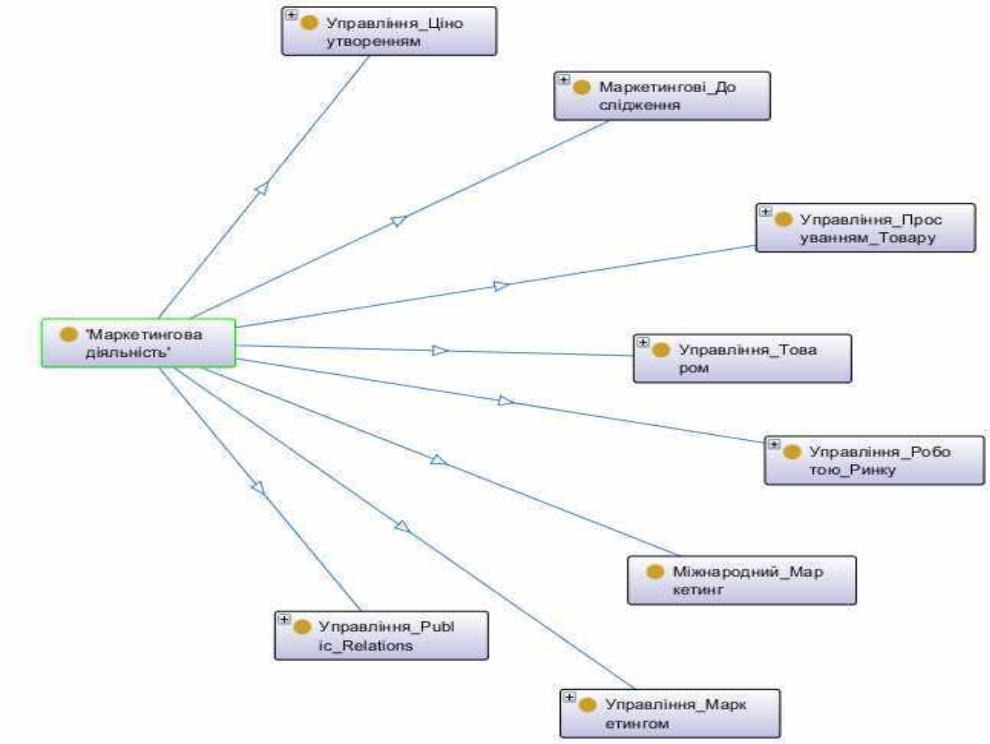


Рисунок 1 – Онтограф предметної області «Маркетингова діяльність»

Джерело: Авторська розробка

Рис.2 демонструє складові (підкласи) класу Маркетингові дослідження

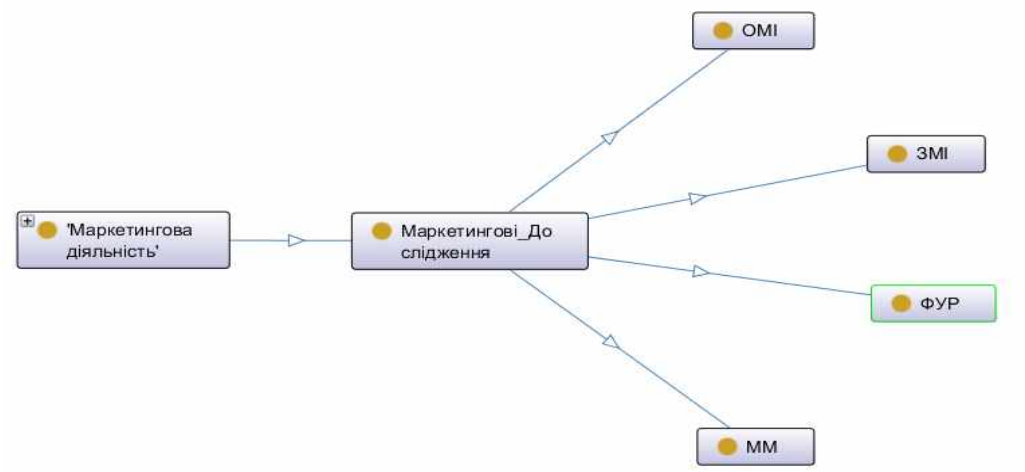


Рисунок 2 – Онтограф класу Маркетингові дослідження

Джерело: Авторська розробка

Підкласами класу Маркетингові дослідження є наступні:
- ЗМІ – Збір маркетингової інформації.
- ММ – Вибір маркетингової стратегії (моделі).
- ОМ – Обробка маркетингової інформації.
- ФУР – Формування управлінських рішень.

На рис.3 представлено ієрархію всіх основних класів та підкласів, що відображені у відповідній онтологічній моделі, побудованій в редакторі онтологій Protégé.



Рисунок 3 – Онтологічна модель предметної області Маркетингова діяльність
(з відповідною ієрархією класів)
Джерело: Авторська розробка

На рис. 3 використано такі скорочення (для відповідних підкласів):

- ЗІП – Зв’язки з іншими підприємствами.
- ФПІП – Формування позитивного іміджу підприємства.
- КРСПП – Координація роботи структурних підрозділів підприємства.
- ННС – Націленість на споживача.
- УМДП – Управління маркетинговою діяльністю підприємства.
- СЗ – Стимулювання збуту..
- СР – Створення реклами.
- ФКРТП – Формування каналів розподілу товарів підприємства.
- ДЗКЗІ – Дії з формування попиту стимулювання збуту.
- ВСР – Вимоги споживача до товару.
- ОРПТ – Оцінювання рівня попиту на товар.
- ПОАП – Проведення опитування / анкетування підприємств
- ВСЦ – Визначення стратегії ціноутворення.
- ВЦТ – Встановлення ціни на товар.
- ВВ – Витрати виробництва.
- ПК – Поведінка конкурентів.
- ПР – Пропозиції на ринку.

– СП – Споживацький попит на товар.

При формуванні онтологічної метамоделі важливим є поділ понять інформаційного простору та інтегрованої моделі. Інформаційний простір заповнюється вихідною інформацією, достовірність якої може бути верифікована. Інтегрована модель вирішує завдання аналізу, збагачення, обробки, інтерпретації даних поверх інформаційного простору. Інформаційний простір має, зокрема:

– реалізувати збір, зберігання, зв'язування та подання інформації;

– забезпечувати побудову впорядкованих асоціативних структур різного роду (на основі відповідних асоціативних правил);

– формувати спеціалізовані уявлення, використовуючи асоціативні структури;

– забезпечувати функціональний взаємозв'язок вихідних даних інформаційного простору з параметрами моделі;

– підтримувати типові рішення для завдань, що повторюються;

– містити способи рішення для нетипових оригінальних завдань.

У системах маркетингових досліджень об'єктивними факторами, що визначають розвиток, є населення та його добробут.

Виходячи з цього пропонується використання такого порядку проведення досліджень з використанням запропонованої онтологічної моделі метарівня, яка передбачає наявність, зокрема, таких підмоделей:

– *Демографічна та кліматичні моделі*. Вихідними даними моделі є статистичні спостереження на території, що розглядається як зовнішня. Результатами розрахунків згідно з обраними моделями, є кількість населення, його розселення територією; температура, опади та інші кліматичні характеристики довкілля, які впливають на поведінку споживачів та їхні потреби.

– *Модель кінцевого споживання продукції*, яку виробляє підприємство. Результатами є очікувані обсяги споживання основних видів продукції (ресурсів).

– *Модель попиту, пропозиції та виробничих можливостей*. Вихідними даними цієї моделі є статистика реалізації, виробництва та запасів продукції, собівартості виробництва, виробничої потужності, інвестиційних планів, прогнозів кінцевого споживання. Результатами є рівноважні ціни на реалізацію продукції, точки беззбитковості, галузі (сфери) конкурентоспроможності, пропозиції до планів продажу.

– *Балансові моделі*, що забезпечують кількісно зумовлені баланси: продуктивних сил (засобів виробництва та персоналу), виробництва, розподілу та використання валової продукції; виробничих навантажень та потужностей, споживання та виробництва; випуск-витрат, фінансових ресурсів. Вихідними даними цих моделей є обсяги споживання, рівноважні ринкові ціни, структура витрат за виробництво окремої продукції. Результатами є дисбаланси та потенціали підприємства (або галузі), вартість, обсяги виробництва та споживання продукції.

– *Моделі розподілу результатів*, що забезпечують оптимізацію розподілу виробництва та реалізації асортименту продукції підприємства з різних ринків, з урахуванням критерію результативності. Вихідними даними цих моделей є структура витрат за продукцію, обсяги й ціни реалізації продукції на ринках. Результатами є коригування планів із виробництва, реалізації продукції, виробництва та розподілу капіталу, пропозиції до виробничих програм.

– *Модель розвитку виробничих потужностей*. Вихідними даними, зокрема, є дисбаланси за економічними потенціалами, граничні обсяги капіталовкладень. Результатами оптимальні плани щодо розвитку виробничих потужностей, визначення напрямків капітальних вкладень для реконструкції, будівництва, модернізації, пропозиції до інвестиційних програм.

– *Модель ризиків*, що забезпечує оцінку соціальних, екологічних та техніко-економічних ризиків (імовірності виконання планів реалізації, виробництва та інвестицій). Вихідними даними є статистика відхилень у виконанні планових показників. Результатом є можливість досягнення планового результату.

Усі джерела даних при проведенні маркетингових досліджень було поділено на п'ять великих груп: нормативно-правова база, рейтинги, індекси, статистика, аналітичні дані.

Більшість даних, що використовуються, має числове значення, навіть аналітичні матеріали в текстовій формі після обробки дозволяють виявити числові значення відповідних показників. Тільки документи із групи «нормативно-правова база» мають у остаточному вигляді вербальне формулювання.

Онтологія, представлена у роботі, являє собою множину понять (метазнань) у предметній області «Маркетингова діяльність» та їхніх зв'язків як між собою, так і з поняттями суміжних предметних областей, що характеризують діяльність підприємства та таких, що мають відношення як до продукції щодо якої відбувається маркетингове дослідження, так і до спільнот (категорій) споживачів з їхніми характерними властивостями та особливостями.

Онтологія визначає зв'язки та взаємозв'язки понять, які, у свою чергу, були поділені на класи, підкласи, екземпляри з позначенням відношень.

Розроблена онтологія може розширюватися та доповнюватися, забезпечуючи структуру для подальшого пошуку та збору даних.

Пропонована онтологічна модель може бути використана, зокрема, для подальших досліджень, пошуку інформації, відповідей на неточно сформульовані запити, подальшого збирання інформації з різних джерел, публікації даних у форматі linked data [AA$$$].

Отримані результати маркетингових досліджень можуть бути використані для створення на їх основі системи прогнозування, аналізу та формулювання економічних і маркетингових висновків, формування нових стратегій розвитку підприємства (або відповідного ринку товарів та товарних послуг).

Висновки. У ході дослідження на основі систематизації існуючих підходів було обґрунтовано доцільність застосування онтологічного моделювання як методу, здатного відобразити складну структуру понять, взаємозв'язків та взаємозалежностей такої предметної області, як «Маркетингова діяльність» (включаючи маркетингові дослідження та маркетингове управління) на макрорівні. Було розвинуто методологію онтологічного моделювання маркетингових понять на макрорівні.

Розроблена онтологічна модель предметної області «Маркетингова діяльність» (у тому числі відповідних досліджень та управління) може бути використана для оптимізації структури маркетингу конкретного підприємства (при реалізації його можливостей у повному обсязі та у конкретних умовах), а також для оцінки ефективності маркетингових досліджень та маркетингового управління.

В онтології відображено вплив результатів маркетингових досліджень на різні види потенціалів підприємства.

Запропонована онтологічна модель є динамічною моделлю відповідно до принципів логіки підвищення глибини охоплення суміжних понять, обліку залежностей та закономірностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухорська У.Р. Роль функцій маркетингу в управлінні підприємством // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України, 2006. Вип. 16.1. С. 410-413.

2. Россоха В.В. Маркетинговий менеджмент в системі управління підприємством //Агроінком, 2012. №10 (12). С. 108-112.

3. Buchta C., Mazanec J. Basic Concepts and a Discrete-Time Model. In: Taudes, A. (eds) Adaptive Information Systems and Modelling in Economics and Management Science. Interdisciplinary Studies in Economics and Management, 2005. vol 5. Vienna: Springer. P. 23-44. DOI: 10.1007/3-211-29901-7_2.

4. Models of Modern Information Economy. URL: https://www.emerald.com/insight/publication/doi/10.1108/9781787562875

5. Blums I., Weigand H. Towards a reference ontology of complex economic exchanges for Accounting Information Systems. //Proc. Of 20th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC 2016). Vienna, Austria, 2016. P. 1-10.

6. Rogushina J., Gladun A. Ontology-based competency analyses in new research domains. //Journal of Computing and Information Technology, 2012. Vol. 20(4). P. 277-291

7. Ткаченко К.О. Нечітке онтологічне моделювання знань в інформаційних навчальних системах. // Водний транспорт, 2020. 3 (31). С.80-91.

8. Lavrischeva E. Ontological Approach to the Formal Specification of the Standard Life Cycle. //Science and Information Conference-2015 (July 28-30, 2015, UK, London). P. 965-972.

9. Berners-Lee T.J. Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to Its Full Potential. The MIT Press, 2005.

10. Liveta P., Mullerb J.-P., Phanc D., Sandersd L. Ontology, a Mediator for Agent-Based Modeling in Social Science. //Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2010. 13(1)3. URL: http://jasss.soc.surrey. ac.uk/13/1/3.html, DOI: 10.18564/jasss.1538

11. Vogrincic S., Bosnic Z. Ontology-based multi-label classification of economic articles. //Computer Science and Information Systems, 2011. № 1. vol. 8. P. 101-119.

12. Grabner C. A systemic framework for the computational analysis of complex economies. An evolutionary-institutional perspective on the ontology, epistemology, and methodology of complexity economics. A thesis submitted to the Doctoral Commission Dr. rer. pol. of the University of Bremen in fulfillment of the requirements for the degree of Dr. rer. pol. Bremen, 2016.

13. Zichermann G., Linder J. Game Based Marketing: Inspire Customer Loyalty Through Rewards, Challenges and Contests. John Wiley & Sons, 2010. 240 p.

14. Holzwarth M., Janiszewski C., Neumann M. The Influence of Avatars on online Consumer Shopping Behavior. //Journal of Marketing, 2016. Vol. 70. P. 19–36.

15. How You Win Big With Gamification in Marketing. URL: https://optinmonster.com/gamification-in-marketing/

16. The power of gamification in marketing for businesses. URL: https://www.thedrum.com/profile/playable/news/the-power-of-gamification-in-marketing-for-businesses

17. KeetM. An Introduction to Ontology Engineering. College Publications, 2018. 256 p.

18. Sowa J. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks/Cole, 2000. 594 p.

19. Daraio C., Lenzerini M., Leporelli P. Data integration for research and innovation policy. // Ontology-Based Data Management approach. Scientometrics, 2016. vol. 106.

20. The Ontolingua ontology library. URL: http://www.ksl.stanford.edu/ software/ontolingua/

21. Protégé. URL: http://protege.stanford.edu/

22. Rubin D.L., Knublauch H., Fergerson R.W. Dameron O., Musen M.A. Protégé-OWL: Creating Ontology-Driven Reasoning Applications with the Web Ontology Language. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1560433/

23. OWL. Web Ontology Language. URL: http://www.w3.org/

24. Allemang D., Hedler J.A. Semantic web for the working ontologist modeling in RDF, RDFS and OWL. Morgan Kaufmann, 2008. 352 p.

25. What Are Linked Data and Linked Open Data. URL: https://www.ontotext.com/knowledgehub/fundamentals/linked-data-linked-open-data/

REFERENCES

1. Sukhorska U.R. (2006). Rol′ funktsiy marketynhu v upravlinni pidpryyemstvom [The role of marketing functions in enterprise management] // Naukovyy visnyk natsional′noho lisotekhnichnoho universytetu Ukrayiny [Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine]. Vol. 16.1. P. 410-413. (in Ukranian).

2. Rossokha V.V. (2012). Marketynhovyy menedzhment v systemi upravlinnya [Marketing management in the enterprise management system] //Agroinkom [Agroinkom]. No. 10 (12). P. 108-112. (in Ukranian).

3. Buchta C., Mazanec J. (2005). Basic Concepts and a Discrete-Time Model. In: Taudes, A. (eds) Adaptive Information Systems and Modelling in Economics and Management Science. Interdisciplinary Studies in Economics and Management. vol 5. Vienna: Springer. P. 23-44. DOI: 10.1007/3-211-29901-7_2.

4. Models of Modern Information Economy. URL: https://www.emerald.com/insight/publication/doi/10.1108/9781787562875

5. Blums I., Weigand H. (2016). Towards a reference ontology of complex economic exchanges for Accounting Information Systems. //Proc. Of 20th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC 2016). Vienna, Austria. P. 1-10.

6. Rogushina J., Gladun A. (2012). Ontology-based competency analyses in new research domains. //Journal of Computing and Information Technology. Vol. 20(4). P. 277-291

7. Tkachenko K.O (2020). Nechitke ontolohichne modelyuvannya znan′ v informatsiynykh navchal′nykh systemakh. [Fuzzy ontological modeling of knowledge in informational educational systems] // Vodnyy transport [Water transport]. 3 (31). P.80-91.

8. Lavrischeva E. Ontological Approach to the Formal Specification of the Standard Life Cycle. //Science and Information Conference-2015 (July 28-30, 2015, UK, London). P. 965-972.

9. Berners-Lee T.J.(2005). Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to Its Full Potential. The MIT Press.

10. Liveta P., Mullerb J.-P., Phanc D., Sandersd L. (2010). Ontology, a Mediator for Agent-Based Modeling in Social Science. //Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 13(1)3. URL: http://jasss.soc.surrey. ac.uk/13/1/3.html, DOI: 10.18564/jasss.1538

11. Vogrincic S., Bosnic Z. (2011). Ontology-based multi-label classification of economic articles. //Computer Science and Information Systems. № 1. vol. 8. P. 101-119.

12. Grabner C. (2016). A systemic framework for the computational analysis of complex economies. An evolutionary-institutional perspective on the ontology, epistemology, and methodology of complexity economics. A thesis submitted to the Doctoral Commission Dr. rer. pol. of the University of Bremen in fulfillment of the requirements for the degree of Dr. rer. pol. Bremen.

13. Zichermann G., Linder J. (2010). Game Based Marketing: Inspire Customer Loyalty Through Rewards, Challenges and Contests. John Wiley & Sons. 240 p.

14. Holzwarth M., Janiszewski C., Neumann M. (2016). The Influence of Avatars on online Consumer Shopping Behavior. //Journal of Marketing. Vol. 70. P. 19–36.

15. How You Win Big With Gamification in Marketing. URL: https://optinmonster.com/gamification-in-marketing/

16. The power of gamification in marketing for businesses. URL: https://www.thedrum.com/profile/playable/news/the-power-of-gamification-in-marketing-for-businesses

17. KeetM. (2018). An Introduction to Ontology Engineering. College Publications. 256 p.

18. Sowa J. (2000). Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks/Cole. 594 p.

19. Daraio C., Lenzerini M., Leporelli P. (2016). Data integration for research and innovation policy. // Ontology-Based Data Management approach. Scientometrics. vol. 106.

20. The Ontolingua ontology library. URL: http://www.ksl.stanford.edu/ software/ontolingua/

21. Protégé. URL: http://protege.stanford.edu/

22. Rubin D.L., Knublauch H., Fergerson R.W. Dameron O., Musen M.A. Protégé-OWL: Creating Ontology-Driven Reasoning Applications with the Web Ontology Language. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1560433/

23. OWL. Web Ontology Language. URL: http://www.w3.org/

24. Allemang D., Hedler J.A. (2008). Semantic web for the working ontologist modeling in RDF, RDFS and OWL. Morgan Kaufmann. 352 p.

25. What Are Linked Data and Linked Open Data. URL: https://www.ontotext.com/knowledgehub/fundamentals/linked-data-linked-open-data/

Tkachenko O.I., Shyian Ya.A.

MARKETING ACTIVITY MODELING: ONTOLOGICAL APPROACH

The problems of modeling complex systems are considered on the example of modeling marketing activity, in general, and marketing research and marketing management, in particular. Some aspects, stages and principles of modeling marketing activity and its various spheres are analyzed. The main requirements for modeling tools for marketing research and marketing management for solving a wide range of theoretical and practical problems of marketing activity and its individual areas are defined. Modeling based on the ontological approach (analysis and appropriate classification of the elements of such a model) was chosen as the way to solve the problems.

The ontological approach is based on the understanding of ontology as a universal form of knowledge presentation. Ontology is an effective tool for modeling various subject areas, objects, processes and information resources. Ontological modeling of the subject area "Marketing activity" will contribute to the solution of practical and theoretical problems thanks to the consideration of factors affecting different levels of the ontological model and its elements. The main provisions and tools for building a meta-level ontology for defining the conceptual ontological model of the subject area under consideration are given. The toolkit is the OWL ontology description language and the Protégé ontology editor.

In the subject area of the study, the expediency of using ontological modeling as a method capable of reflecting such a complex subject area as "Marketing activity" at the macro level was substantiated. The methodology of ontological modeling of marketing concepts at the macro level was developed. The developed ontological model of the subject area "Marketing activity" can be used to optimize the marketing structure of a specific enterprise (when realizing its capabilities in full and under specific conditions), as well as to evaluate the effectiveness of marketing research and marketing management. The proposed ontological model is a dynamic model in accordance with the principles of the logic of increasing the depth of coverage of related concepts, accounting for dependencies and regularities.

Keywords: *ontology, ontological model, marketing activity, marketing research, marketing management, subject area, OWL, Protégé, ontograph.*

УДК 004. 004.4, 004.9, 004.8 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.34

Ткаченко О.А., Болячевець Я.Ю.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ВЕБДОДАТКІВ

Використання вебдодатків у різних сферах людської діяльності (економіці, освіті, науці, дозвіллі) обумовило стрімке зростання технологій, методів та засобів розробки вебдодатків, підвищило рівень складності користувацьких інтерфейсів. В статті відзначено, що зі збільшенням інформації, з якою користувач взаємодіє у вебдодатку, збільшилася і кількість

користувачів зі своїми особливостями сприйняття інформації та вимогами щодо комфортності й інтуїтивній зрозумілості інтерфейсів

Вебдодатки використовують комбінацію серверних і клієнтських сценаріїв для виконання завдань користувача. Проаналізовано використання фреймворків та бібліотек для програмування клієнтської частини вебдодатку, зокрема, такі як: Reactjs, Create React App, Babel, Webpack. Програмування серверної частини підтримується, зокрема, Node.js (наприклад, при розробці online-чату, вебсайтів для потокового відео). Розглянуто основні причини поширення вебдодатків, зокрема: залучення споживачів, кросплатформеність, використання централізованих даних, забезпечення безпеки конфіденційної інформації, простота обслуговування, динамічне розширення та оновлення, доступність та підтримка клієнтів (користувачів вебдодатку). Наведено основні положення та інструментарій розробки сучасних вебдодатків. Розглянуто сучасні програмні засоби розробки вебдодатків та моделювання користувацьких інтерфейсів.

Розглянуто класифікацію сучасних вебдодатків, до якої, зокрема, було віднесено: вебсайти, орієнтовані на документи, інтерактивні вебдодатки, транзакційні вебдодатки, вебдодатки (вебсервіси) на основі робочого процесу, спільні вебдодатки, вебдодатки, орієнтовані на портал, універсальні вебдодатки, вебдодатки на основі знань, традиційні вебдодатки, розширені вебдодатки мають динамічний вміст, містять велику кількість інформації, їх легко інтегрувати та прогресивні вебдодатки.

В результаті проведеного аналізу вебдодатків та технологій їх створення було визначено, що вони мають запропоновувати постійну високоякісну продуктивність незалежно від розміру екрана, щільності пікселів і пристрою, який використовується для доступу до програми. Крім того, коли користувач впроваджує сенсорну взаємодію та адаптивний дизайн у процес розробки, то можна отримати зручність, що є важливим, бо власники вебдодатків намагаються досягти того, щоб користувачі були задоволені, а так звана «видимість» можливостей вебдодатку була найвищою.

Ключові слова: *вебдодаток, вебсайт, вебсторінка, HTML, CSS, JavaScript, фреймворк, клієнт-серверна технологія, користувацький інтерфейс, моделювання користувацького інтерфейсу.*

Вступ. Сучасна інформатизація кожного дня отримує активний імпульс до інноваційного розвитку [1 – 5]. Сучасний світ (бізнес, наука, освіта, дозвілля, держава і суспільство) вже потребує нових інструментів і технологій. В наш час майже всі компанії обмінюються інформацією в Інтернеті, а система освіти здійснює процес навчання. На сьогоднішній день вебдодатки (вебпрограми, вебзастосунки) є настільки поширеними, що іноді залишаються непоміченими. Сучасне суспільство використовує вебдодатки в різних областях своєї діяльності.

Вебдодаток дозволяє виконувати завдання через Інтернет. Це програма, яка запускає запити та функціонує через вебтехнології та веббраузери. Вебсайт – сукупність вебсторінок, інформаційного характеру. Вебсайт містить контент (текст, зображення, аудіо- та відеофайли, тощо), видає користувачеві доступні для перегляду готові HTML-сторінки, аутентифікація не є обов'язковою. Такі сайти часто називають статичними. Можна сказати, що вебдодаток – програмне забезпечення, яке працює на основі клієнт-серверної технології.

Вебдодатки (вебзастосунки, вебсайти, веб-орієнтовані системи) стали в наш час невід’ємною частиною нашої діяльності: бізнесу, освіти, дозвілля, тощо. Важливою та актуальною проблемою постає зручність як розробки, так і використання вебдодатків.

Розробники потребують сучасних технологій розробки вебдодатків, зокрема, таких, що забезпечують швидке, ефективне та зручне проектування, моделювання інтерфейсу, тестування вебдодатків.

Користувачі надають перевагу швидким вебдодаткам, які швидко завантажуються та не потребують наявності великих ресурсів від відповідного пристрою (наприклад, комп’ютера,

мобільного телефона). При цьому користувачі звертають увагу на швидкість завантаження вебдодатку та його надійність.

Наприклад, підприємства електронної комерції (Інтернет-магазинів, online-магазинів) можуть дуже швидко втратити як вже наявних, так і не залучити потенційних користувачів своїх вебдодатків (чи відповідних вебсайтів), якщо вони стикаються з проблемою, зокрема, довгого очікування відповіді на свій запит через недостатньо високу швидкість завантаження та функціонування вебдодатку.

Постановка проблеми. Широке впровадження вебдодатків у різні сфери людської діяльності спричинило стрімке зростання технологій, методів та засобів розробки вебдодатків, підвищило рівень складності користувацьких інтерфейсів. Одночасно зі збільшенням інформації, з якою користувач взаємодіє у вебдодатку, збільшилася кількість самих користувачів зі своїми особливостями сприйняття інформації та вимогами щодо зрозумілості, комфортності та інтуїтивності інтерфейсів.

Також зросла кількість апаратних засобів, на яких повинен функціонувати вебдодаток. Зручність використання та користувацький досвід можуть стати вирішальними факторами успіху або невдачі вебдодатків та вебсайтів.

Тому актуальність проблеми дослідження та проведення аналізу сучасних технологій розробки та використання вебдодатків (в тому числі й їхніх інтерфейсів). У результаті гостро постала необхідність моделювання користувацьких інтерфейсів, які б надавали можливість ефективної взаємодії користувача зі складною системою, при цьому не обмежуючи її функціональні можливості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розробка та використання різних типів вебдодатків досліджувалася різними вченими, як Сотнік С., Ляшенко В. [1, 2], Ашраф С. [5], Ткаченко О.А. [9]. Зокрема, Башовий, В.М., Стаценко В.В., Стаценко Д.В [7] проводили аналіз швидкодії вебдодатків, розроблених за допомогою різних сучасних фреймворків.

Мета дослідження. Основною метою роботи, що пропонується, є дослідження деяких аспектів розробки (технологій, методів, засобів, підходів, мов програмування) та використання сучасних вебдодатків, моделювання користувацького інтерфейсу, опис класифікації сучасних вебдодатків.

Основний матеріал дослідження. Технології розробки вебдодатків є важливим аспектом подальшого успіху/невдачі використання цих додатків. Вибір технологій розробки має високий рівень значущості особливо для підприємств малого бізнесу чи приватних осіб, що обумовлено, зокрема, невеликим бюджетом, який вони можуть спрямувати на таку розробку. Великі компанії мають більше можливостей ретельно дослідити сучасні технології, звертаючи увагу крім фінансової складової на показники кількості користувачів, що одночасно можуть працювати з їхнім вебдодатком.

У веброзробок є: клієнтська (інтерфейс) та серверна сторони, тобто для будь-якого вебдодатку характерним є наявність клієнта та сервера.

Клієнт (*frontend*) відповідає за інтерфейс та взаємодію з користувачем, в той час як сервер (*backend*) зберігає в собі інформацію на публічних або приватних API та ділиться нею в залежності від запитів користувача. Клієнт відправляє свої запити на сервер та очікує від нього відповіді.

Вебдодатки використовують комбінацію серверних і клієнтських сценаріїв для виконання завдань користувача [27]. З огляду на те, що мільйони компаній використовують Інтернет як свою маркетингову стратегію, вебдодаток має надавати інформацію, зберігати дані, обробляти транзакції та взаємодіяти з потенційними споживачами.

Розробка на стороні сервера включає програму, базу даних і сервер [27]. Сервер відповідає за обробку запитів клієнта, включає в себе бізнес-логіку, зберігання та оновлення різних баз даних. Для структурованих баз даних використовують SQL, MySQL, для слабоструктурованих підійде NoSQL, MongoDB [28, 29], для роботи з кешем Redis [17]. Наведемо деякі основні компоненти інтерфейсу:

– мова розмітки гіпертексту (HTML) та каскадні таблиці стилів (CSS) [18]. HTML повідомляє браузеру, як відображати контент вебсторінок, тоді як CSS надає стилістичне відображення цього контенту [27, 29, 30];

– JavaScript (JS) [19] робить вебсторінки інтерактивними. Існує багато бібліотек JavaScript та фреймворків для швидшої та простішої веброзробки (наприклад, jQuery, React.js, Angularjs, Vue.js [1, 2, 10, 11, 26]).

З серверною стороною взаємодія відбувається за допомогою запитів. Сучасні феріймворки та мови програмування (наприклад, Ruby on Rails (Ruby) [27], Django (Python) [27], Spring (Java) [20], Nestjs (Node.js) [20]) доступні для реалізації серверної частини.

JavaScript був створений, щоб зробити вебсторінки більш динамічними. Програми на JavaScript – скрипти – можуть вбудовуватися в HTML і виконуватися при завантаженні вебсторінки [29].

Сьогодні JavaScript [19] може виконуватися не тільки в браузері, а й на сервері або на будь-якому іншому пристрої [28], який має спеціальну програму, що називається «рушій» JavaScript. У браузерів є власні рушії (так звані «віртуальні машини JavaScript»). В Chrome і Opera – рушій V8, в Firefox – SpiderMonkey.

В наш час з'являються нові стандарти та виклики у створенні вебдодатків. JavaScript є мовою з динамічною типізацію [19, 27], тому Microsoft презентувала нову мову програмування TypeScript [21] над рівнем JavaScript. TypeScript поєднує перевірку типу і статичний аналіз, явні інтерфейси та найкращі практики.

Перегляд основної вебсторінки передбачає виконання наступних кроків (рис.1) [27– 30]:

1. Користувач вводить адресу вебсторінки.
2. Браузер посилає запит до DNS (Domain Name System – система доменних імен) [29].
3. DNS [29] робить запит до Root Server (кореневого серверу) [22].
4. Root Server [27, 29] повертає IP-адресу TLD (Top-Level Domain) Server [23].
5. DNS [29] робить запит до TLD Server.
6. TLD Server [23] повертає IP-адресу Authoritative Name Server [24].
7. DNS робить запит до Authoritative Name Server.
8. Authoritative Name Server повертає IP-адресу сервера вебдодатку.
9. Браузер робить запит до IP-адресу сервера вебдодатку.
10. Сервер вебдодатку повертає контент користувачеві.

Root Server – сервер у ланцюгу DNS відповідає за роботу кореневої зони DNS, тобто відповідні за трансляцію IP-адрес доменів верхнього рівня: а саме UA, COM, ORG і т.д. [27].

TLD Server – сервер найвищого рівня доменних імен (наприклад UA).

Authoritative Name Server – сервер, який повертає IP-адресу вебдодатку, щодо якого був запит користувача.

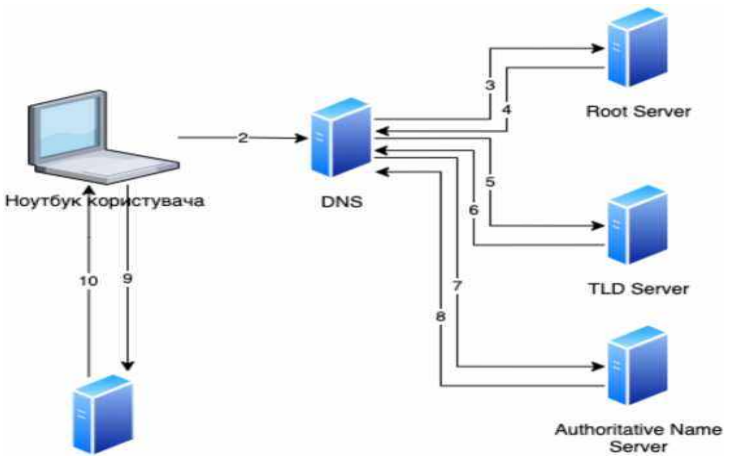


Рисунок 1 – Перегляд вебсайту вебдодатку

Існує багато фреймворків та бібліотек для програмування клієнтської частини вебдодатку, зокрема, такі як:

– React (React.js) [25] – бібліотека JavaScript з відкритим кодом, яка використовується для побудови інтерфейсів (веб та мобільних) [27, 29, 30]. React дозволяє розробникам створювати вебдодатки, які можуть змінювати дані на екрані користувача без перезавантаження вебсторінки. Ця бібліотека легко масштабується, проста у використанні та швидка у дії. Прикладами вебдодатків, побудованими за допомогою React, зокрема, є: facebook.com, dropbox.com, Airbnb.com, Netflix.com, reddit.com, bbc.com.

– Create React App – інструмент, який допомогає створювати вебдодатки, використовуючи React, що не потребує від розробника трудомісткого налаштування. Create React App не обробляє бізнес-логіку, не використовує бази даних, він лише створює шаблон React-додатку, тому розробник може використовувати його з будь-якою серверною базою. Create React app використовує Babel та Webpack [11, 27, 29].

– Babel – набір інструментів, який використовується для перетворення коду ECMAScript 2015+ у сумісну версію JavaScript у старих браузерах або середовищах [12].

– Webpack – конструктор модулів, який працює під час розробки [13, 29]. За допомогою Webpack розробник використовує конфігурацію, щоб налаштувати завантаження конкретних модуліі і файлів.

Програмування серверної частини підтримується, зокрема, Node.js [20] – платформою на основі JavaScript, яка використовується при розробці додатків, наприклад, для online-чату, вебсайтів для потокового відео, що є відкритою і повністю безкоштовною, тому Node.js користуються тисячі розробників. Це робить Node.js кращим вибором, ніж інші платформи на стороні сервера, такі як Java або PHP.

API-бібліотеки Node.js є асинхронними (тобто не блокуються), тому сервер на базі Node.js не чекає, поки API поверне дані. Сервер Node.js реагує неблокуючим способом, що робить його дуже масштабованим на відміну від традиційних серверів, які створюють обмежені потоки для обробки запитів [27, 29, 30].

Основними причинами поширення вебдодатків, зокрема, є:

– *Залучення споживачів*. Для виходу компанії на світовий ринок слід донести всю потрібну інформацію до цільової аудиторії. Сервери вебдодатків діють як платформа для демонстрації продуктів/послуг і залучення споживчої бази компанії.

– *Кросплатформеність*. Сучасні вебдодатки працюють на кількох платформах на відміну від мобільних додатків, розроблених лише для певної платформи.

– *Централізовані дані*. Дані відіграють важливу роль у діяльності підприємства бізнесу, наукової чи освітньої установи, пересічного користувача. Вебдодати мають більш низький рівень обмежень щодо даних, доступних кожному.

– *Безпека*. Вебдодатки, які розгортаються на виділених серверах і контролюються адміністраторами серверів, забезпечують високий рівень безпеки та конфіденційності online-даних, щоб запобігти можливому витоку конфіденційної інформації.

– *Обслуговування.* Оскільки вебдодатки використовують веббраузери, то вони займають мінімальні об’єми пам’яті для зберігання даних. Оновлення розгортаються та працюють у фоновому режимі (при мінімальному втручанні людини).

– *Розширення та оновлення*. Online-дані потребують постійного оновлення (наприклад, для підприємства електронної комерції вебдодаток повинен постійно мати оновленні дані про запаси та нові продукти). У вебдодатках розробникам потрібно додавати лише оновлений новий вміст на серверах замість внесення змін у весь вихідний файл.

– *Доступність*. Ціна створення вебдодатку має бути економічною обгрунтованою та збалансованою. Для вебдодатків електронної комерції перевага online-продажів полягає в тому, що вони доступні в будь-який час, в будь-якій частині світу, в будь-який час.

– *Конкретна перевага*. Компанії досягають конкретної переваги за допомогою вебдодатків. Створюючи налаштований вебдодаток, компанії можуть розробляти індивідуальне програмне забезпечення, операційні системи та рішення для своїх клієнтів.

– *Уникнення обмежень*. Вебдодатки уникають членства в магазинах програмних продуктів і обмежень, дозволяючи компаніям випускати свої версії. Існують різні види хмарних інструментів, які використовуються компаніями для розширення сховища.

– *Підтримка клієнтів (користувачів)*. Вебдодатки розробляються так, щоб служба підтримки клієнтів була доступна в будь-який час і можна було підвищувати лояльність клієнтів (користувачів).

Сучасні користувачі висувають дуже високі вимоги до сучасних вебдодатків, зокрема, на їхній погляд, вебдодатки повинні:

– бути доступними 24/7 у будь-якій частині світу;

– мати можливість бути використаними з будь-якого пристрою з будь-яким розміром екрана та іншими характеристиками;

– забезпечувати безпеку даних користувачів, захищаючи їх від несанкціонованого доступу та кібератак;

– бути гнучкими та масштабованими;

– мати клієнто-орієнтований інтерфейс.

Розглядаючи особливості сучасних вебдодатків, слід виділити такі, як:

– Наявність характеристик, які сприяють вирішенню проблеми будуть чи ні користувачі використовувати той чи інший вебдодаток для вирішення своїх проблем, отримання потрібної інформації, товару чи послуги, і якщо будуть, то як довго вони будуть залишатися на вебсайті таких додатків і користуватися ними потім.

– нативність вебдодатків, коли користувач відразу може знайти потрібну інформацію (отримати відповідь на свій запит).

– кросплатформеність, яка передбачає і використання різних операційних систем, і різних пристроїв, тощо.

Розглянемо класифікацію сучасних вебдодатків та їхні характеристики:

– *Вебсайти, орієнтовані на документи* – статичні html-документи, що зберігаються на ве-сервері та надсилаються безпосередньо клієнту згідно з їхнім запитом. Вебсайти оновлюються користувачами (в цьому випадку – розробниками) власноруч за допомогою відповідних інструментів. Ці програми є статичними, простими, стабільними та потребують небагато часу для формування відповіді на запит користувача. Ціна обслуговування цих програм є високою (особливо при необхідності оновлення). Крім того такі програми мають проблему неузгодженості через статичність та відсутність своєчасного динамічного оновлення інформації.

– *Інтерактивні вебдодатки*, що пропонують CGI, HTML Forms [18]. Вони містять перемикачі, меню вибору, форми тощо. Ці вебдодатки є простими та з високим рівнем швидкодії. У такому додатку відповідні вебсторінки та посилання (гіперпосилання) генеруються згідно з введеними користувачами даними (в тому числі і в їхніх запитах).

– *Транзакційні вебдодатки* мають можливість модифікувати користувачів, вони є більш інтерактивними та підтримують структуровані запити до своїх баз даних, в яких здійснюється обробка даних послідовно та ефективно.

– *Вебдодатки* (вебсервіси) *на основі робочого процесу* здатні передавати робочий процес (точніше інформацію, яка необхідна для функціонування того чи іншого робочого процесу (це можуть бути, наприклад, фінансові, логістичні, фінансові та інші бізнес-процеси) між компаніями, приватними, громадськими або державними органами. Вебсервіси включені для сумісності. Такі вебдодатки потужні, надійні та гнучкі, щоб використовуватися для керування робочим процесом при автономії компаній. Одним з найкращих прикладів таких застосувань є рішення електронної комерції B2B.

– *Спільні вебдодатки*, які, в основному, використовуються як групові програмні продукти, де важливим є групове спілкування. Прикладами таких вебдодатків, зокрема, є: чати, online-форуми, вебсайти online-навчання або вебсайти (наприклад, Вікіпедія), де користувачі обмінюється різноманітною інформацією з можливістю її подальшого використання та редагування.

– *Вебдодатки, орієнтовані на портал*, в яких єдина точка доступу існує для розділення різних джерел інформації та послуг. Прикладами таких вебдодатків, зокрема, є: пошукові системи, портали різних спільнот (наприклад, навчальних, за інтересами, професійних, релігійних тощо).

– *Універсальні вебдодатки* надають персоналізовані засоби для будь-якого пристрою з будь-якого місця в будь-який час. Такі вебдодатки мають обмежені можливості взаємодії та підтримують обмежену кількість пристроїв. Для динамічного налаштування цих вебдодатків потрібно мати попередні знання щодо контексту, де конкретний вебдодаток має використовуватися. Прикладом таких вебдодатків є додатки надання послуг на основі місцезнаходження користувача.

– *Вебдодатки на основі знань* використовуються для надання знань як користувачеві, так і відповідному пристрою (персональному комп'ютеру, мобільному телефону, тощо).. Управління знаннями базується на семантичних вебтехнологіях (прикладами таких вебдодатків семантичний web, зв'язування і повторне використання знань).

Традиційні вебдодатки були менш складними, мали, зокрема:

– статичний вміст;
– обмежені сфери використання;
– обмежену функціональність та інтерактивність;
– забезпечення лише мінімального рівня безпеки;
– недостатні можливостей своєчасного оновлення.

Розширені вебдодатки мають динамічний вміст, містять велику кількість інформації, їх легко інтегрувати, розкладати та планувати, підтримують більш ефективне забезпечення безпеки даних [11].

Прогресивні вебдодатки:

– працюють на будь-якій платформі: Windows, macOS, Linux;
– працюють в усіх основних браузерах;
– сумісні зі стільниковими та мобільними пристроями з усіма розмірами екрана;
– автоматично масштабують візуальні елементи.

Прогресивні вебдодатки підтримують: функцію push-сповіщення, роботу в автономному режимі, нативні програми, створені за допомогою SDK для iOS і Android.

Прогресивні вебдодатки дозволяють також використовувати HTML5, CSS разом із фреймворками JavaScript чи Typescript [20] для створення продукту з нуля. Angular і React [25] є одними з найпопулярніших інтерфейсних технологій, які використовуються для створення PWA (Progressive Web Application, прогресивний вебдодаток). Нові версії Angular забезпечують вбудовану підтримку PWA. React є основою для React Native, що дозволяє легко переносити додатки, створені за допомогою React, у нативні додатки. Використання JavaScript для серверної частини не є обов'язковим, можна використовувати будь-який технологічний стек.

Прогресивні вебдодатки є одним з типів вебсайту або вебсторінки. Тому при завантаженні прогресивного вебдодатку як окремого програмного продукту для iPhone або Android через Apple не обов'язкові App Store або Google Play. Замість того, щоб завантажувати його з App Store, користувач може просто завантажити вебдодаток у свій веббраузер (Google Chrome, Safari Opera тощо).

Використання мов програмування при розробці будь-якого типу вебдодатку залежить від функціоналу конкретного вебдодатку та вимог до нього. Найбільш популярною мовою для стартапів на даний момент є JavaScript, поширені також Python, Java, PHP та інші.

JavaScript – мова програмування, яка відповідає за логіку та динаміку вебдодатку, таку як анімація, валідація, взаємодія з формами та з користувачем, в цілому.

Важливою для сучасного додатку є концепція асинхронних запитів AJAX в JavaScript, в результаті чого користувач отримує тільки необхідні дані в форматі JSON [19] або XML [19] та підставляє їх на відповідне місце сторінки. Вебдодатки, що мають одну сторінку та оновлюються відповідно до отриманих даних, називаються SPA (*Single-Page Application*).

При збільшенні проєкту росте і кількість станів інтерфейсу. Для роботи з даними використовують такі бібліотеки керування станом як MobX, Redux, VueX [5, 10, 11]. Вони спрощують оновлення даних та стандартизують цей процес, в результаті зменшується кількість помилок та пришвидшується розробка.

Зі зростанням вебдодатку та збільшенням кількості даних стає актуальним питання підвищення відмовостійкості, тому розумним є використання розподілених баз даних (*Distributed Databases*) які використовують декілька дата-центрів і забезпечують безвідмовну роботу вебдодатку

Сучасні вебдодатки великих розмірів використовують мікросервісну архітектуру, де кожен сервіс відповідає за свою функцію, що спрощує та пришвидшує розгортання і розробку проєкту, підвищує відмовостійкість його [12].

Для створення мікросервісів на Java використовується популярна технологія Spring Boot, для JavaScript підійде Node.js, також використовують Docker для створення обгорток мікросервісів. Щоб забезпечити контроль доступу, зручність та безпечность доступу до різних мікросервісів активно використовують API Gateway.

Компанія Amazon – власник великого, конкурентного, найбільш успішного та технологічного вебдодатку [14].

Вебдодаток, зображений на рис. 2 здебільшого є Single-Page Application, майже всі дії відбуваються на одній HTML-сторінці та динамічно оновлюються без необхідності перезавантаження сторінки. Це робить додаток швидким і зручним для користувача. В деяких випадках зустрічається MPA (*Multi-Page Application*), але це пов’язано з віддаленням від основної області діяльності вебдодатку.

На головній сторінці вебдодатку використано багато компонентів React-бібліотеки, що створює та підтримує динамічний інтерфейс і дає можливість перевикористовувати (повторно використовувати) деякий функціонал в інших місцях вебдодатку, що спрощує та пришвидшує його розробку, а також зменшує кількість можливих помилок.



Рисунок 2 – Головна сторінка Amazon
Джерело: [14]

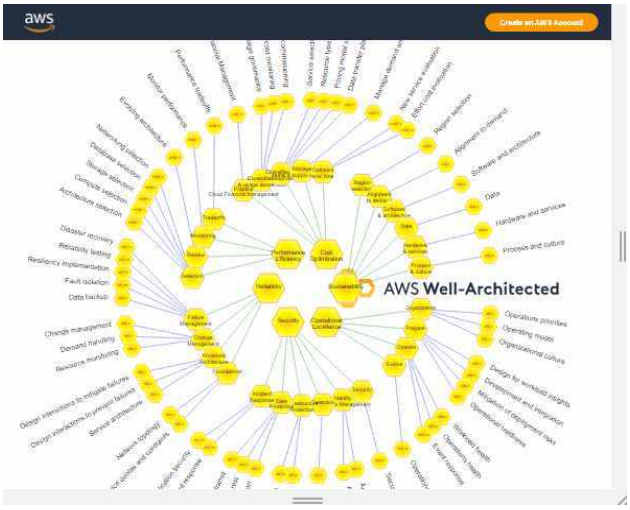


Рисунок 3 – Архітектура хмарної технології Amazon Web Services
Джерело: [14]

В якості баз даних Amazon використовує власну розробку Amazon Web Services (AWS). Розташування серверів відбувається в різних регіонах світу, що забезпечує швидший доступ до інформації та підвищену відмовостійкість всього вебдодатку. AWS працює на основі розподіленої архітектури і надає велике коло послуг для користувачів (рис 3) у всьому світі, відповідає за інфраструктуру, обробку даних платежів та іншого.

Вебдодаток (рис. 2) використовує мікросервісну архітектуру, на головній сторінці зустрічаються такі сервіси як авторизації користувача, обробки замовлень, пошуку товарів, корзини, рекомендації, сортування та інші. Програмні продукти Amazon не мають відкритого коду, який є комерційною таємницею компанії, тому важко більш детально проаналізувати використання сучасних технологій використаних при розробці їх програмних продуктів

Поширення вебдодатків та різке збільшення кількості їхніх користувачів загострило проблему розробки адекватного запитам користувачів інтерфейсу. Одним з ефективних підходів до розробки користувацьких інтерфейсів є їх моделювання, яке може бути орієнтовано, зокрема, на використання дизайну (usage-centered design, UCD) [15, 16].

Usage-centered design – використання моделей для проєктування системи, яка підтримує всі завдання, що необхідно виконати користувачам [16]. Цей процес легко масштабується і використовується в проєктах з невеликими ресурсами. Дизайн засновано на таких зв'язаних моделях, як: роль, завдання та контент.

Модель ролі відображає головні характеристики ролей, які грають користувачі по відношенню до вебдодатку, тобто які типи відношень користувачі можуть мати з вебдодатком. Серед можливих аспектів цих відношень можна виділити, зокрема, мету, частоту взаємодії, обсяг і спрямованість інформаційного обміну тощо.

Модель завдання представляє структуру роботи, яку користувачі повинні виконати в результаті взаємодії з вебдодатком.

Модель контенту представляє вміст і організацію користувацького інтерфейсу для підтримки визначених завдань. Перелік завдань формують випадки використання (use cases) – послідовності дій, які включають в себе можливі помилки та взаємодіють з додатком.

Після визначення ролей користувачів майбутнього інтерфейсу та формування випадків використання здійснюється побудова мапи випадків використання (task cases map), яка відображає зв'язки між реальними прикладами завдань та представляє собою діаграму, що показує всі випадки завдання та їх взаємозв'язки.

Розробка варіантів використання завершується побудовою абстрактних прототипів, які дозволяють розробникам проєктувати загальну організацію та архітектуру користувацького інтерфейсу вебдодатку без візуалізації її компонентів або деталізації макета. Абстрактні прототипи складаються з моделі контенту інтерфейсу, що описує вміст контекстів, у яких користувач взаємодіє з вебдодатком, та містить контекстну навігаційну мапу, яка показує, як користувачі переходять від одного контексту до іншого під час виконання задач (task cases).

Використання абстрактних прототипів має ряд переваг, зокрема [16]:

– вони надають повну картину загальної архітектури інтерфейсу;
– абстрактний характер моделей дозволяє відкласти прийняття детальних рішень;
– використання абстрактного прототипу як керівництво до побудови остаточного візуального дизайну забезпечує більш інноваційний користувацький інтерфейс

Системні актори – це програмні та апаратні системні компоненти вебдодатку, з якими повинен взаємодіяти інтерфейс, вони відокремлені від акторів, що мають ролі користувачів.

За таким підходом кожна сторінка, форма чи інший контекст взаємодії відповідає абстрактному прототипу, що підтримує взаємопов'язані випадки задач.

Компоненти користувацького інтерфейсу (кнопки, посилання, таблиці, екрани тощо) походять з абстрактних компонентів, які реалізують конкретні кроки в межах підтримуваних випадків завдання. Варіанти завдань, в свою чергу, підтримують виконання ролей, які користувачі можуть виконувати щодо вебдодатку. Такий підхід до проєктування

користувацького інтерфейсу гарантує, що кінцевий варіант інтерфейсу повністю покриває усі можливі варіанти взаємодії користувача з вебдодатком та надає можливість внесення змін у прототип з мінімальними витратами часу.

Висновки. В результаті проведеного аналізу сучасних вебдодатків та технологій їх створення було визначено, що вебдодатки мають запропоновувати постійну високоякісну продуктивність незалежно від розміру екрана, щільності пікселів і пристрою, який використовується для доступу до програми.

Крім того, коли користувач впроваджує сенсорну взаємодію та адаптивний дизайн у процес розробки, то можна отримати зручність, що є важливим, бо власники вебдодатків намагаються досягти того, щоб користувачі були задоволені, а так звана «видимість» можливостей вебдодатку була найвищою.

Таким чином, у статті проведено аналіз особливостей розробки вебдодатків, розглянуто характеристики вебдодатків та їхня класифікація (типізація).

Розглянуто сучасні програмні засоби розробки вебдодатків та моделювання користувацьких інтерфейсів.

В статті наведено основні причини поширення використання вебдодатків в різних сферах життєдіяльності людини, суспільства, держави.

ЛИТЕРАТУРА

1. Al-Sherrawi M., Saadoon M., Sotnik S., Lyashenko V. Information model of plastic products formation process duration by injection molding method. //International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018. Vol. 9(3). P. 357-366.

2. Sotnik S., Nevliudova V., Malaya I. Developing the information search system for selecting the moulds forming elements. //Innovative technologies and scientific solutions for industries, 2017. 2(2). P. 86-92.

3. Sotnik S., Belova N., Lyashenko V., Mohammad A. Informational and Structural-Parametric Models of Inductions Micromotors. //Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 2018. P. 66-76.

4. Deineko Z., Sotnik S., Lyashenko V. Confidentiality of Information when Using QR-Coding. // IJAISR, 2022. Vol. 6. Issue 9. P. 10-15.

5. Ashraf S. Avoiding Vulnerabilities and Attacks with a Proactive Strategy for Web Applications. //Advances in Robotics and Mechanical Engineering, 2021. Vol. Issue 2.

6. Jazayeri M., Mesnage C.S., Rose J., Jazayeri M. Modern Web Application Development //Emerging Methods, Technologies, and Process Management in Software Engineering. John Wiley and Sons Inc., 2007. P. 131-147.

7. Башовий, В.М., Стаценко В.В., Стаценко Д.В. Визначення швидкості роботи сучасних фреймворків для створення web-інтерфейсів //Технології та інжиніринг, 2022. №4(9). С. 9 -16.

8. Gohan, N.V., Gohan V.V., Afanasieva I.V. Black and white-box unit testing for web applications // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології, 2022.. № 1 (7). С. 79-83.

9. Ткаченко О.А., Ткаченко О.І. Деякі аспекти ситуаційно-семантичного моделювання складних об'єктів, процесів та систем //Водний транспорт, 2017. Вип.№ 1 (26). С.129-133.

10. Brandon, D.M. (ed.). Software Engineering for Modern Web Applications: Methodologies and Technologies: Methodologies and Technologies. IGI Global, 2008. 402 p.

11. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications. New York: O'Reilly Media, 2012. 336 p.

12. Most popular technologies. Stackoverflow. URL: https://insights.stackoverflow.com/survey/2021#most-popular-technologies-language

13. Simpson K. Up & Going. New York: O'Reilly Media, 2017. 642 p.

14. Amazon. URL: https://www.amazon.com/

15. Anderson J., Fleek F. Integrating Usability Techniques into Software Development. //IEEE Software, 2017. 18 (1). P. 168-182.

16. Cloyd M.H. Designing User-Centered Web Applications in Web Time. //IEEE Software, 2017. 18 (1). P. 94-105.

17. Comparing Database Management Systems: MySQL, PostgreSQL, MSSQL Server, MongoDB, Elasticsearch, and others. URL: https://www.altexsoft.com/blog/business/comparing-database-management-systems-mysql-postgresql-mssql-server-mongodb-elasticsearch-and-others/

18. HTML For Beginners The Easy Way: Start Learning HTML & CSS Today. URL: https://html.com

19. JavaScript reference. URL: https://devdocs.io/javascript/

20. Introduction to Node.js. URL: https://nodejs.dev/en/learn/

21. What is TypeScript? URL: https://www.typescriptlang.org

22. Root Servers. URL: https://www.iana.org/domains/root/servers

23. What is a TLD Server? URL: https://threat.media/definition/what-is-a-tld-server/

24. What is Authoritative DNS server? URL: https://www.cloudns.net/blog/authoritative-dns-server/

25. React. The library for web and native user interfaces. URL: https://react.dev

26. The Progressive JavaScript Framework. URL: https://vuejs.org

27. Гайтан О.М., Бочкарь В.О. Методи моделювання користувацького інтерфейсу веб-додатків. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/10492/1/vol1-365-368.pdf

28. Грінько К.О. Дослідження методів обробки природної мови для створення карти D&D. https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/18894/1/2021_M_PI_Grinko_KO.pdf.

29. Шепелєв І.Н. Інформаційна система оцінювання швидкості завантаження веб-додатків. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/82567/1/Shepeliev_mag_rob.pdf;jsessionid=FC8C43B60B82159FACB1F82CDA7FAEE4

30. Розробка веб-додатків. URL: https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/689a8d92-140e-4825-b47f- 3b07b085929d/content

REFERENCES

1. Al-Sherrawi M., Saadoon M., Sotnik S., Lyashenko V. (2018). Information model of plastic products formation process duration by injection molding method. //International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 9(3). P. 357-366.

2. Sotnik S., Nevliudova V., Malaya I. (2017). Developing the information search system for selecting the moulds forming elements. //Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2(2). P. 86-92.

3. Sotnik S., Belova N., Lyashenko V., Mohammad A. (2018). Informational and Structural-Parametric Models of Inductions Micromotors. //Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). P. 66-76.

4. Deineko Z., Sotnik S., Lyashenko V. (2022). Confidentiality of Information when Using QR-Coding. // IJAISR. 2022. Vol. 6. Issue 9. P. 10-15.

5. Ashraf S. (2021). Avoiding Vulnerabilities and Attacks with a Proactive Strategy for Web Applications. //Advances in Robotics and Mechanical Engineering. Vol. Issue 2.

6. Jazayeri M., Mesnage C.S., Rose J., Jazayeri M. (2007). Modern Web Application Development //Emerging Methods, Technologies, and Process Management in Software Engineering. 8(3). P. 131-147.

7. Bashovy, V.M., Statsenko V.V., Statsenko D.V. (2022). Vyznachennya shvydkosti roboty suchasnykh freymvorkiv dlya stvorennya web-interfeysiv [Determining the speed of operation of modern frameworks for creating web interfaces]. // Tekhnolohiyi ta inzhynirynh [Technologies and engineering]. № 4 (9). P. 9-16. (in Ukranian).

8. Gohan, N.V., Gohan V.V., Afanasieva I.V. (2022). Black and white-box unit testing for web

applications // Visnyk Natsional′noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, management and information technologies]. № 1 (7). P. 79 - 83.

9. Tkachenko O.A., Tkachenko O.I. (2017). Deyaki aspekty sytuatsiyno-semantychnoho modelyuvannya skladnykh ob″yektiv, protsesiv ta system [Some aspects of situational-semantic modeling of complex objects, processes and systems] // Vodnyy transport [Water transport]. Vyp. № 1 (26). P.129-133. (in Ukranian).

10. Brandon, D.M. (ed.). (2008). Software Engineering for Modern Web Applications: Methodologies and Technologies: Methodologies and Technologies. IGI Global. 402 p.

11. Kleppmann M. (2012). Designing Data-Intensive Applications. New York: O'Reilly Media. 336 p.

12. Most popular technologies. Stackoverflow. URL: https://insights.stackoverflow.com/survey/2021#most-popular-technologies-language

13. Simpson K. (2017). Up & Going. New York: O'Reilly Media. 642 p.

14. Amazon. URL: https://www.amazon.com/

15. Anderson J., Fleek F. (2017). Integrating Usability Techniques into Software Development. //IEEE Software. 18 (1). P. 168-182.

16. Cloyd M.H. (2017). Designing User-Centered Web Applications in Web Time. //IEEE Software. 18 (1). P. 94-105.

17. Comparing Database Management Systems: MySQL, PostgreSQL, MSSQL Server, MongoDB, Elasticsearch, and others. URL: https://www.altexsoft.com/blog/business/comparing-database-management-systems-mysql-postgresql-mssql-server-mongodb-elasticsearch-and-others/

18. HTML For Beginners The Easy Way: Start Learning HTML & CSS Today. URL: https://html.com

19. JavaScript reference. URL: https://devdocs.io/javascript/

20. Introduction to Node.js. URL: https://nodejs.dev/en/learn/

21. What is TypeScript? URL: https://www.typescriptlang.org

22. Root Servers. URL: https://www.iana.org/domains/root/servers

23. What is a TLD Server? URL: https://threat.media/definition/what-is-a-tld-server/

24. What is Authoritative DNS server? URL: https://www.cloudns.net/blog/authoritative-dns-server/

25. React. The library for web and native user interfaces. URL: https://react.dev

26. The Progressive JavaScript Framework. URL: https://vuejs.org

27. Haytan O.M., Bochkar V.O. Metody modelyuvannya korystuvats′koho interfeysu veb-dodatkiv. [Methods of modeling the user interface of web applications]. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/10492/1/vol1-365-368.pdf (in Ukranian).

28. Grinko K.O. Doslidzhennya metodiv obrobky pryrodnoyi movy dlya stvorennya karty D&D. [Study of natural language processing methods for creating a map D&D]. URL: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/18894/1/2021_M_PI_Grinko_KO.pdf. (in Ukranian).

29. Shepelev I.N. Informatsiyna systema otsinyuvannya shvydkosti zavantazhennya veb-dodatkiv [Information system for evaluating the speed of loading web applications]. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/82567/1/Shepeliev_mag_rob.pdf;jsessionid=FC8C43B60B82159FACB1F82CDA7FAEE4. (in Ukranian).

30. Rozrobka vebdodatkiv [Development of web applications]. URL: https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/689a8d92-140e-4825-b47f-3b07b085929d/content. (in Ukranian).

Tkachenko O.A., Boliachevets Ya.Yu.

SOME ASPECTS OF THE DEVELOPMENT AND USE OF MODERN WEB APPLICATIONS

The use of web applications in various spheres of human activity (economy, education, science, leisure) led to the rapid growth of technologies, methods and means of developing web applications,

and increased the level of complexity of user interfaces. The article noted that with the increase in information with which the user interacts in the web application, the number of users with their own peculiarities of information perception and requirements for comfort and intuitiveness of interfaces also increased.

Web applications use a combination of server-side and client-side scripting to perform user tasks. The use of frameworks and libraries for programming the client part of the web application was analyzed, in particular, such as: Reactjs, Create React App, Babel, Webpack. Server-side programming is supported, in particular, by Node.js (for example, when developing online chat, websites for streaming video). The main reasons for the spread of web applications are considered, in particular: attracting consumers, cross-platform, use of centralized data, ensuring the security of confidential information, ease of maintenance, dynamic expansion and updating, availability and support of customers (users of the web application). The main provisions and tools for the development of modern web applications are presented. Modern software tools for developing web applications and modeling user interfaces are considered.

The classification of modern web applications was considered, which, in particular, included: document-oriented websites, interactive web applications, transactional web applications, workflow-based web applications (web services), shared web applications, portal-oriented web applications, universal web applications, knowledge-based web applications , traditional web applications, rich web applications that have dynamic content, contain a large amount of information, are easy to integrate, and progressive web applications.

As a result of the analysis of web applications and their creation technologies, it was determined that they should offer consistent high-quality performance regardless of screen size, pixel density and the device used to access the application. In addition, when the user introduces touch interaction and responsive design into the development process, convenience can be obtained, which is important because web application owners try to achieve user satisfaction and the so-called "visibility" of the web application's capabilities is the highest.

***Keywords**: web application, website, web page, HTML, CSS, JavaScript, framework, client-server technology, user interface, user interface modeling.*

УДК 004.056(477) doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.35

Богом'я В.І.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ КІБЕРАТАК

Кібербезпека є актуальною в Україні, так як сучасний світ все більше залежить від технологій та інформаційних систем. Це створює нові можливості для зростаючої загрози кібербезпеки в Україні.

Актуальність теми в контексті зростаючої загрози кібербезпеки в Україні означає необхідність вивчення даної теми у зв'язку із зростанням загрози кібербезпеки в Україні. Це може бути пов'язане зі збільшенням кількості та складності кібератак, які спрямовані проти українських організацій, владних структур чи громадян.

Сучасний стан кіберзаходів та важливість ефективних заходів для захисту від кібератаків вказує на поточний рівень заходів, які приймаються для кіберзахисту в Україні, і визначає

важливість розробки та впровадження ефективних заходів для захисту від кібератаків. Це може включати вдосконалення технічних систем, вдосконалення стратегій кібербезпеки та впровадження новітніх технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, для підвищення рівня захисту від кіберзагроз.

Аналіз поточних досліджень та розроблення в галузі застосування штучного інтелекту для кібербезпеки визначив такі напрями: алгоритми виявлення аномалії, прогнозування кібератак, автоматизовані системи реагування.

Перегляд успішного використання машинного навчання для кіберзагроз дозволів визначити такі напрями: визначення загрози в реальному часі, аналіз великих обсягів даних, інтеграція з іншими технологіями, система навчання на власних помилках.

Цей аналіз дозволяє застосувати сучасний стан досліджень у галузі та переваги та обмеження використання штучного інтелекту та машинного навчання для захисту від кібератаків.

Виявлення та запобігання кібератак є важливим науковим завданням, яке потребує дослідження та вирішення. Застосування штучного інтелекту та машинного навчання є одним з основних методів вирішення цього завдання. Врахування особливостей системи та використання оптимальних методів захисту є важливими факторами для успішного розв'язання цього наукового завдання.

Тому метою статті є визначення особливостей використання штучного інтелекту та машинного навчання для виявлення та запобігання кібератак.

Ключові слова: *кібербезпека, системи штучного інтелекту, машинне навчання, рекомендації, кіберзагрози, алгоритми, виявлення аномалій*

Постановка проблеми

Кібербезпека є актуальною в Україні, так як сучасний світ все більше залежить від технологій та інформаційних систем [1–3]. Це створює нові можливості для зростаючої загрози кібербезпеки в Україні.

Актуальність теми в контексті зростаючої загрози кібербезпеки в Україні означає необхідність вивчення даної теми у зв'язку із зростанням загрози кібербезпеки в Україні. Це може бути пов'язане зі збільшенням кількості та складності кібератак, які спрямовані проти українських організацій, владних структур чи громадян.

Сучасний стан кіберзаходів та важливість ефективних заходів для захисту від кібератаків вказує на поточний рівень заходів, які приймаються для кіберзахисту в Україні, і визначає важливість розробки та впровадження ефективних заходів для захисту від кібератаків. Це може включати вдосконалення технічних систем, вдосконалення стратегій кібербезпеки та впровадження новітніх технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, для підвищення рівня захисту від кіберзагроз [4].

Застосування методів в кібербезпеці. Розглянемо види задач, які можна розв’язувати методами штучного інтелекту [5–8]: регресія (або прогноз) - завдання прогнозування наступного значення на основі попередніх знань; класифікація - завдання розділення явищ на різні категорії. Еталони що відповідають класам, відомі; кластеризація - класи невідомі, групування за схожістю; правила пошуку асоціацій (або рекомендацій) - завдання рекомендувати щось на основі попереднього досвіду; зменшення розмірності - узагальнення, завдання пошуку інших і найбільш важливих ознак у ряді зразків; генеративні моделі - завдання створення чогось на основі попередніх знань про розподіл.

Класи машинного навчання [4–8, 15]: **Supervised learning** (навчання з учителем) – умова – розмічені дані, із вказівкою наприклад, шкідливий файл чи ні. правильна конструкція чи ні. На основі розмічених даних приймається рішення про нові дані. **Ensemble learning** - розширення

supervised learning, змішення простих моделей для одержання більш ефективної складної. **Навчання без учителя** – підхід, який використовується коли нема розмічених даних, і модель повинна розмітити їх самостійно, засновуючись на певних властивостях. Призначається для пошуку аномалій, менш точний ніж контрольовані підходи. **Навчання з підкріпленням** (reinforced learning) – підхід, орієнтований на зворотний зв'язок від середовища, коли поведінка моделі має реагувати на зміни середовища. **Active learning** – підклас навчання із підкріпленням, коли «учитель» допомагає виправляти поведінку на додачу до зміни середовища [5–8, 15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз поточних досліджень та розроблення в галузі застосування штучного інтелекту для кібербезпеки візначів такі напрями [5–9]:

1. Алгоритми виявлення аномалії.
2. Прогнозування кібератак.
3. Автоматизовані системи реагування.

Перегляд успішного використання машинного навчання для кіберзагроз дозволів визначити такі напрями [4–9]:

1. Визначення загрози в реальному часі.
2. Аналіз великих обсягів даних.
3. Інтеграція з іншими технологіями.
4. Система навчання на власних помилках.

Цей аналіз дозволяє застосувати сучасний стан досліджень у галузі та переваги та обмеження використання штучного інтелекту та машинного навчання для захисту від кіберзагроз.

Мета статті. Виявлення та запобігання кібератак є важливим науковим завданням, яке потребує дослідження та вирішення. Застосування штучного інтелекту та машинного навчання є одним з основних методів вирішення цього завдання. Врахування особливостей системи та використання оптимальних методів захисту є важливими факторами для успішного розв'язання цього наукового завдання [10, 16].

Тому метою статті є визначення особливостей використання штучного інтелекту та машинного навчання для виявлення та запобігання кібератак.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз поточних досліджень та розроблень в галузі застосування штучного інтелекту для кібербезпеки визначив такі напрями [1-3, 5-10, 15].

Алгоритми виявлення аномалії. Дослідження використання алгоритмів машинного навчання для виявлення аномальної активності в комп'ютерних системах та оцінка ефективності методів навчання без учителя для виявлення невідомих кіберзагроз.

Прогнозування кібератак. Розгляд застосування штучного інтелекту для прогнозування можливих кібератак на основі аналізу попередніх зразків та здобуття інформації про нові загрози, оцінка точності та швидкості таких систем передбачення.

Автоматизовані системи реагування. Аналіз розробок у галузі створення автоматизованих систем, які використовують штучний інтелект для реагування на кібератаки та визначення переваг та обмеження таких систем у реальному часі.

Перегляд успішного використання машинного навчання для кіберзагроз дозволів визначити такі напрями:

Визначення загрози в реальному часі. Розгляд повідомлення, де системи машинного навчання успішно виявляли кіберзагрози в реальному часі, забезпечуючи швидке реагування на якісь загрози.

Аналіз великих обсягів даних. Перегляд проектів, де машинне навчання успішно використовувалося для аналізу та відсіювання великих обсягів даних, щоб визначити кібератаки та підвищити ефективність дій.

Інтеграція з іншими технологіями. Аналіз успішної інтеграції системи машинного навчання з іншими технологіями (наприклад, блокчейн, криптографія) для підвищення рівня кібербезпеки.

Система навчання на власних помилках. Оцінка методів навчання систем на власних помилках для постійного вдосконалення їхньої здатності виявляють нові типи кіберзагроз.

Цей аналіз дозволяє застосувати сучасний стан досліджень у галузі та переваги та обмеження використання штучного інтелекту та машинного навчання для захисту від кіберзагроз.

Також результати цього аналізу допоможуть визначити основні проблеми та слабкі місця сучасного стану кібербезпеки в Україні, а також розробити напрямки подальшого вдосконалення системи кіберзахисту в країні.

Статистика кіберзагроз – провести аналіз офіційної статистики щодо кількості та типів кібератаків в Україні за останні роки та оцінити тенденції у розвитку кіберзагроз та їхніх характеристик.

Приклади кібератак – провести розгляд конкретних кібератак на українські організації, включаючи урядові структури, підприємства та інші сектори та проаналізувати методи, які використовуються у кібератаках, та їхніх можливих наслідків.

Оцінка основних викликів – визначити ключові фактори, які збільшують уразливість українських систем до кіберзагроз та проаналізувати фактори, такі як недостатні ресурси, низький рівень кіберосвіти.

Слабкі місця у системах кіберзахисту – проаналізувати системи кіберзахисту в різних секторах, включаючи критичну інфраструктуру, фінансовий сектор та державні органи та визначення найбільш вразливих точок та показників, де страждають слабкі місця у системах кіберзахисту.

Позначення важливих тенденцій – виявлення ключових тенденцій у розвитку кіберзагрози та методів їхньої боротьби та оцінка впливу новітніх технологій, таких як штучний інтелект, на зміну ландшафту кібербезпеки в Україні.

Системи штучного інтелекту можуть допомогти у кібербезпеці України, виявляючи та аналізуючи потенційні загрози, виявлення аномальної активності в мережі, а також удосконалення систем виявлення вторгнень. Вони можуть вдосконалювати аналіз великого обсягу даних, швидше розпізнавати вразливості та реагувати на нові види кібератак за допомогою вже відомих методів [11–16].

Так, наприклад:

Машинне навчання – системи можуть навчатися звичайному патерну поведінки мережі та виявляти аномальну активність, що може свідчити про атаку.

Прогнозування загроз – аналіз великих даних, штучний інтелект може обробляти великі обсяги даних для виявлення тенденцій та попередження про можливі кіберзагрози.

Виявлення вразливостей – сканування за допомогою інтелектуальних агентів, використання агентів, які автоматично сканують систему на предмет вразливостей та слабких місць.

Аналіз поведінки – використання систем, які аналізують поведінку користувачів та системи для виявлення невідповідностей та потенційних загроз.

Автоматизована відповідь на інциденти – використання систем, які автоматично реагують на кібератаки, блокуючи атаку та відновлюючи нормальну роботу системи.

Виявлення аномалій.

Ці методи дозволяють ефективніше виявляти, аналізувати та реагувати на кіберзагрози, забезпечуючи вищий рівень кібербезпеки для України.

Слід відмитити, що виявлення аномалій за допомогою машинного навчання може використовувати різноманітні методи. Один із популярних підходів - це навчання моделі на

"нормальному" поведінці системи та виявлення аномальних змін. Ось кілька конкретних прикладів [9–15]:

Метод одного класу – навчання моделі лише на "нормальних" даних, а потім використання цієї моделі для виявлення будь-якої аномальної активності. Наприклад, автентифікація користувача на основі його звичайного патерну входження.

Метод здоров'я системи – аналіз здоров'я системи, такий як використання різних метрик продуктивності. Виявлення аномальних відхилень від звичайних значень може свідчити про можливий вторгнення або проблеми з безпекою.

Метод кластеризації – розділення даних на кластери та виявлення екземплярів, які не належать жодному з кластерів. Аномалії можуть бути представлені як окремі кластери або як окремі точки.

Використання нейронних мереж – використання рекурентних нейронних мереж для моделювання звичайних послідовностей дій та виявлення аномалій в нових даних.

Ці підходи дозволяють системам машинного навчання навчатися на основі стандартного патерну поведінки та виявляти аномалії, які можуть вказувати на потенційні кіберзагрози [2, 17].

Як виглядає типова схема або алгоритм для виявлення аномалій за допомогою машинного навчання (див. рис.1):

Збір даних – збирання "нормальних" даних, що представляють звичайне функціонування системи або мережі.

Навчання моделі – використання цих даних для навчання моделі машинного навчання. Може використовуватися метод одного класу, кластеризація або інші техніки.

Валідація моделі – тестування моделі на даних, які не використовувалися під час навчання, для перевірки ефективності та точності виявлення аномалій.

Визначення порогу – встановлення порогу, за яким визначається, коли певна активність вважається аномалією. Це може бути на основі відхилення від звичайного патерну або інших параметрів.

Виявлення аномалій в реальному часі – застосування моделі до нових даних в реальному часі для виявлення аномалій або ненормальної активності.



Рисунок 1 – Типова схема для виявлення аномалій за допомогою машинного навчання

Втручання чи сповіщення – визначення механізмів втручання або сповіщення, які активуються в разі виявлення аномалій, щоб вчасно реагувати на потенційні загрози.

Оновлення моделі – регулярне оновлення моделі з урахуванням нових даних та змін у патерні поведінки системи.

Ця схема може варіюватися в залежності від конкретного використання та типу даних, але вона відображає загальний процес виявлення аномалій за допомогою машинного навчання в кібербезпеці.

Висновки й перспективи подальших досліджень. Покращення рівня кіберзахисту в Україні може включати в себе ряд заходів та рекомендацій, спрямованих на вирішення виявлених викликів та усунення слабких місць. Наприклад:

1. Зміцнення інформаційно-комунікаційної інфраструктури (ІКТ).

Рекомендація: Забезпечення безпеки критичних інфраструктур, зокрема систем енергетики, транспорту та інших важливих галузей.

Дії: Проведення аудиту та аналізу існуючих ІКТ-систем, впровадження сучасних систем виявлення та захисту, застосування стандартів кіберзахисту.

2. Підвищення обізнаності та навичок.

Рекомендація: Розвиток кадрового потенціалу та підвищення обізнаності про кіберзагрози серед персоналу.

Дії: Організація тренінгів, семінарів та навчання з питань кібербезпеки для урядових служб, підприємств та громадян.

3. Регулярні аудити та тестування на вразливості.

Рекомендація: Проведення регулярних аудитів та тестувань на вразливості для виявлення слабких місць у системах.

Дії: Залучення експертів для проведення аудитів, використання автоматизованих інструментів для тестування вразливостей.

4. Створення національної стратегії кібербезпеки.

Рекомендація: Розроблення та впровадження національної стратегії з кібербезпеки, яка враховує сучасні тенденції та виклики.

Дії: Залучення експертів, представників громадянського суспільства та бізнесу до процесу розробки стратегії, визначення конкретних заходів та відповідальних структур.

5. Розвиток міжнародного співробітництва.

Рекомендація: Активна участь в міжнародних ініціативах та обмін інформацією про кіберзагрози з іншими країнами та організаціями.

Дії: Підписання та виконання міжнародних угод про кібербезпеку, створення каналів обміну інформацією та співпраці з іншими країнами.

Ці рекомендації можуть служити вихідною точкою для розробки комплексного плану з покращення кіберзахисту в Україні, враховуючи специфічні виклики та потреби країни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрахам, А., Камарудін, С., і Чай, С. Т. (2020). Опитування щодо використання штучного інтелекту в кібербезпеці. Комп’ютери та безпека, 88, 101628 с.

2. Caviglione, L., Coccoli, M., Lops, C., & Nocerino, R.(2019). Застосування машинного навчання до кібербезпеки: вичерпний огляд. Прикладні науки, 9(10), 2038 с.

3. Poonia, P., Sharma, S.K., & Kumar, A. (2020). Система виявлення вторгнень на основі машинного навчання: комплексне дослідження. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 11(9), С. 3963-3983.

4. Чжан, Х., Хуан, Х., і Чжан, Ю. (2019). Дослідження прогресу штучного інтелекту в кібербезпеці. Міжнародний журнал систем обчислювального інтелекту, 12 (1), С. 316-326.

5. Чжан Ю., Чен В., Ян Дж. та Сю В. (2019). Машинне навчання в кібербезпеці. IEEE Access, 7, С.108700- 108707

6. S. Varshney et al, Review of various Artificial Intelligence Techniques and its applications, 2019. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 594 012023, DOI: 10.1088/1757-899X/594/1/012023.

7. G. Belani, The Use of Artificial Intelligence in Cybersecurity: A Review URL: https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/the-use-ofartificial-intelligence-in-cybersecurity.

8. S. Ray, 7 Regression Techniques you should know! URL: https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/08/comprehensive-guideregression/

9. "AI and cybersecurity: The future of cyber defence" [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.forbes.com/sites/andrewrossow/2021

10. "The role of AI in cybersecurity" by John Boitnot " [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https:// venturebeat. com /2018/03/31/the-role-ofai- in-cybersecurity/

11. Ду, М., Лі, Ф., Чжен, Г., і Срікумар, В. (2019). DeepLog: виявлення та діагностика аномалій із системних журналів за допомогою глибокого навчання. ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS), 22(4), 1-27. https: // doi. org/ 10.1145 /3338501

12. Бланко, Е., Атлідакіс, В., Фонсека, Р. (2020). Drain3: гнучкий і ефективний фреймворк аналізу журналів. Матеріали конференції USENIX 2020 року з оперативного машинного навчання (OpML 20). https:/ /www.usenix.org/ conference/opml20/ presentation/blanco

13. "How AI is transforming cybersecurity" by Gary Eastwood, " [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https: / / www. Information - age. com/how-ai-is-transforming-cybersecurity-123478294/

14. Кларк, Дж., Джейкоб, Дж. (2018). ШІ та кібербезпека: загрози та рішення. Журнал кібербезпеки, 4(1), С. 1-14.

15. Методи штучного інтелекту в кібербезпеці [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів спец. 125 «Кібербезпека» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І.В. Стьопочкіна, О.М. Новіков. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 – 82 с.

16. Богом'я В.І., Кочегаров В.С. Кібербезпека в хмарних сервісах за допомогою застосування криптографічних методів. Водний транспорт. № 1 (37). 2023. 239–246 с. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.27

17. Gonfalonieri, How to Build A Data Set For Your Machine Learning Project, 2019. URL: https://towardsdatascience.com/how-to-build-a-dataset-for-your-machine-learning-project-5b3b871881ac

REFERENCE

1. Abraham, A., Kamarudin, S., & Chai, S. T. (2020). A survey on the use of artificial intelligence in cyber security. Computers and security, 88, 101628 p.

2. Caviglione, L., Coccoli, M., Lops, C., & Nocerino, R. (2019). Applications of Machine Learning to Cyber Security: A Comprehensive Review. Applied Sciences, 9(10), 2038 p.

3. Poonia, P., Sharma, S.K., & Kumar, A. (2020). Intrusion detection system based on machine learning: a comprehensive study. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 11(9), pp. 3963-3983.

4. Zhang, H., Huang, X., & Zhang, Y. (2019). Exploring the Advances of Artificial Intelligence in Cyber Security. International Journal of Computational Intelligence Systems, 12 (1), pp. 316-326.

5. Zhang, Y., Chen, W., Yang, J., and Xu, W. (2019). Machine learning in cyber security. IEEE Access, 7, pp. 108700-108707

6. S. Varshney et al, Review of various Artificial Intelligence Techniques and its applications, 2019. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 594 012023, DOI: 10.1088/1757-899X/594/1/012023.

7. G. Belani, The Use of Artificial Intelligence in Cybersecurity: A Review URL: https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/the-use-ofartificial-intelligence-in-cybersecurity.

8. S. Ray, 7 Regression Techniques you should know! URL: https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/08/comprehensive-guideregression/

9. "AI and cybersecurity: The future of cyber defense" [Electronic resource]. Mode of access to the resource: https://www.forbes.com/sites/andrewrossow/2021

10. "The role of AI in cybersecurity" by John Boitnot " [Electronic resource]. Mode of access to the resource: https:// venturebeat. com /2018/03/31/the-role-ofai- in-cybersecurity/

11. Du, M., Li, F., Zheng, H., & Sreekumar, V. (2019). DeepLog: Detecting and diagnosing anomalies from system logs using deep learning. ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS), 22(4), 1-27. https: // doi. org/ 10.1145 /3338501

12. Blanco, E., Atlidakis, V., Fonseca, R. (2020). Drain3: A flexible and efficient log analysis framework. Proceedings of the 2020 USENIX Conference on Operational Machine Learning (OpML 20). https:/ /www.usenix.org/ conference/opml20/ presentation/blanco

13. "How AI is transforming cybersecurity" by Gary Eastwood, " [Electronic resource]. Mode of access to the resource: https: / / www. Information - age. com/how-ai-is-transforming-cybersecurity-123478294/

14. Clark, J., Jacob, J. (2018). AI and Cyber Security: Threats and Solutions. Journal of Cybersecurity, 4(1), pp. 1-14.

15. Methods of artificial intelligence in cyber security [Electronic resource]: training. manual for applicants of special 125 "Cyberbezpeka" / KPI named after Igor Sikorskyi; comp.: I.V. Styopochkina, O.M. Novikov. – Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2022 - 82 p.

16. Bogomya V.I., Kochegarov V.S. Cyber security in cloud services using cryptographic methods. Water transport. No. 1 (37). 2023. pp. 239–246. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.27

17. Gonfalonieri, How to Build A Data Set For Your Machine Learning Project, 2019. URL: https://towardsdatascience.com/how-to-build-a-dataset-for-your-machine-learning-project-5b3b871881ac

Bohomia V.I.

The Use of Artificial Intelligence and Machine Learning for Cyber Attack Detection and Prevention: Features and Recommendations

Cybersecurity is a crucial issue in Ukraine, given the increasing reliance on technology and information systems in the modern world. This dependence creates new opportunities for the growing threat of cybersecurity in Ukraine.

The relevance of the topic, in the context of the rising cybersecurity threat in Ukraine, signifies the necessity to study this issue due to the increasing frequency and complexity of cyber attacks targeting Ukrainian organizations, governmental structures, and citizens.

The current state of cybersecurity measures and the importance of effective actions against cyber attacks indicate the current level of efforts taken for cybersecurity in Ukraine. It emphasizes the importance of developing and implementing effective measures to protect against cyber threats. This may include improving technical systems, enhancing cybersecurity strategies, and adopting advanced technologies such as artificial intelligence and machine learning to elevate the level of protection against cyber threats.

The analysis of current research and developments in the application of artificial intelligence for cybersecurity has identified several directions: anomaly detection algorithms, prediction of cyber attacks, and automated response systems.

A review of successful applications of machine learning for cyber threats has identified directions such as real-time threat detection, big data analysis, integration with other technologies, and a self-learning system.

This analysis allows for the application of current research in the field, considering the advantages and limitations of using artificial intelligence and machine learning for protection against cyber attacks.

The detection and prevention of cyber attacks are crucial scientific tasks that require research and resolution. The application of artificial intelligence and machine learning is one of the primary methods to address this task successfully. Taking into account the system's peculiarities and utilizing optimal protection methods are vital factors for the successful resolution of this scientific task.

Therefore, the aim of this article is to identify the features of using artificial intelligence and machine learning for the detection and prevention of cyber attacks.

Keywords: *cybersecurity, artificial intelligence systems, machine learning, recommendations, cyber threats, algorithms, anomaly detection.*

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 629.5+339.1 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.36

Лопатюк С.П.

ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНОГО МАРКЕТИНГУ НА ВНУТРІШНЬОМУ ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ

З набуттям чинності Закону «Про внутрішній водний транспорт» особливе значення має розбудова сучасної інфраструктури внутрішніх водних шляхів з екологічним флотом. Хоча внутрішній водний транспорт вважається одним з найчистіших видів транспорту, погіршення стану довкілля обумовлює посилення вимог до викидів шкідливих речовин атмосферу і водне середовище з суден, до розбудови внутрішніх водних шляхів, до підготовки екологічно свідомого плавскладу. Значну роль в цьому процесі має відігравати екологічний маркетинг на внутрішньому водному транспорті.

В статті розглядаються види екологічного маркетингу для різних об'єктів внутрішнього водного транспорту. Приділяється увага екологічній компетентності фахівців галузі.

***Ключові слова**: внутрішній водний транспорт, екологічний маркетинг, маркетингове середовище, ринок екологічних товарів (послуг).*

Постановка проблеми. Становленню екологічного маркетингу на внутрішньому водному транспорті сприяють прийнятий в грудні 2020 року Закон України «Про внутрішній водний транспорт» і розроблена на його підставі Міністерством інфраструктури України Стратегія розвитку внутрішнього водного транспорту на 2021−2031 роки. Стратегія пропонує впровадження інноваційних енергоефективних та екологічних технологій на внутрішніх водних шляхах, забезпечення відповідності річкового флоту екологічним стандартам Європейського Союзу. Необхідним є осмислення видів і можливостей екологічного маркетингу для втілення цілей і задач розробленої Стратегії.

Вступ. Водний транспортний комплекс - це багатофункціональна структура, яка включає морський та річковий флот, морські та річкові порти, гідротехнічні споруди внутрішніх водних шляхів, рейди, затони, місця стоянки суден, засоби навігаційного обладнання та гідрографічного забезпечення судноплавства, об'єкти річкової інформаційної служби, мережі та споруди зв'язку, сигналізації, інформування та управління рухом суден та інші об'єкти, що забезпечують судноплавство морськими та внутрішніми водними шляхами [1,2]. Від відповідності вітчизняного водного транспортного комплексу сучасним міжнародним екологічним вимогам залежить стан природних ресурсів України та конкурентоспроможність українського водного транспорту на світовому ринку.

Мета дослідження полягає в виявленні особливостей екологічного маркетингу при побудові модернізованого внутрішнього флоту, осучасненні гідротехнічних споруд, організації перевезень судновласниками, технологічних процесів завантаження-розвантаження в портах, при підготовці кваліфікованих спеціалістів для внутрішнього водного транспорту.

Основні матеріали дослідження. Концепція екологічного маркетингу з'явилась у 1970-ті роки практично одночасно з концепцією сталого розвитку людства. Екологічний маркетинг передбачає орієнтацію усієї діяльності організації (установи, підприємства) на формування та задоволення екологічно орієнтованого попиту з метою отримання прибутку та збереження довкілля і здоров'я людей [3].

Розрізняють такі типи екологічного маркетингу:

– маркетинг звичайних товарів (послуг), які виробляються (здійснюються) з врахуванням екологічних стандартів та вимог природоохоронного законодавства;

– маркетинг екологічних товарів та послуг, який спрямований. на задоволення екологічних потреб населення, які зумовлені підвищенням екологічної свідомості;

– маркетинг природоохоронної діяльності з метою збереження середовища й генофонду біосфери, проведення відповідних заходів щодо відновлення порушених екосистем.

– маркетинг екологічних знань та екологічно безпечних технологій, суб'єктами якого є наукові організації, навчальні заклади, провідні підприємства та установи, які впроваджують або пропагують новітні «зелені» технології [4].

Суб'єктами екологічного маркетингу на внутрішньому водному транспорті є: судна, гідротехнічні споруди внутрішніх водних шляхів, рейди, затони, місця стоянки суден, засоби навігаційного обладнання та гідрографічного забезпечення судноплавства, об'єкти річкової інформаційної служби, мережі та споруди зв'язку, сигналізації, інформування та управління рухом суден, а також плавуче обладнання, призначене для виконання шляхових робіт, та інші об'єкти, що забезпечують судноплавство внутрішніми водними шляхами [2], суднобудівні підприємства, судноплавні компанії, профільні навчальні заклади. В залежності від призначення суб'єкта екологічний маркетинг має бути спрямований на впровадження безпечних технологій, створення модернізованого «зеленого» флоту, захист навколишнього середовища, задоволення екологічних потреб населення, на підготовку кваліфікованого персоналу в галузі екології, пропаганду екологічних переваг водного транспорту перед іншими видами транспорту.

Внутрішній водний транспорт вважається найчистішим видом транспорту [5]. Але в Україні більшість суден річкового флоту є застарілими і такими, що користуються дизельним паливом, що має найвищий рівень викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин, порівняно з альтернативними видами палива. Тому екологічний маркетинг на суднобудівних підприємствах необхідно спрямовувати на модернізацію суднового енергетичного обладнання. Рівень викидів для нових суден з новими двигунами має відповідати стандартам ЄС. Згідно Закону України «Про внутрішній водний транспорт» пріоритетними напрямами інвестування у сфері внутрішнього водного транспорту визначається запровадження інноваційних енергоефективних та екологічно безпечних технологій. Але відносно низька вартість дизельного палива впливає на економічну доцільність використання операторами суден чистих технологій. Уряд має створити систему стимулювання розвитку екологічного судноплавства та зменшення рівня викидів у портах та на водних шляхах.

Концепція екологічного маркетингу на внутрішньому водному транспорті має орієнтувати виробників не тільки на сприйняття цього виду транспорту як відносно безпечного для довкілля, але й такого, що відповідає вимогам збалансованого розвитку, який враховує взаємозв'язки між економічною, соціальною та екологічної системами, зосереджує увагу на глобальних суспільних проблемах [6]. За рахунок переорієнтації вантажопотоку на модернізований ВВТ очікується зменшення викидів в атмосферу забруднюючих речовин та парникових газів від автомобільного транспорту. Зменшиться знос автодорожньої мережі, шумове навантаження, кількість небезпек, пов'язаних з аваріями на автомобільному транспорті [7]. Включення ВВТ в систему мультимодальних перевезень дозволить транспортувати вантажі суднами типу «ріка-море» між великими промисловими центрами країни та чорноморськими портами без додаткового перевантаження, звільнивши автомобільний і залізничний транспорт від нерентабельних перевезень [1]. Метою екологічного маркетингу на ВВТ повинне бути дотримання вимог щодо використання та охорони водних об'єктів.

Маркетингове середовище суб'єктів внутрішнього водного транспорту формується під впливом системи державного управління. Стратегією розвитку внутрішнього водного транспорту передбачена реорганізація адміністративних функцій центральних органів виконавчої влади з забезпеченням ефективного менеджменту і механізмів швидкого реагування на екологічні проблеми всіх суб'єктів ВВТ.

Складові середовища екологічного маркетингу суб'єкта господарювання умовно поділяють на елементи та їх взаємозв'язки, що формують мікросередовище, та елементи та їх взаємозв'язки, що формують макросередовище [3] .

Складові мікросередовища частково контролюються підприємством (установою, організацією, закладом). Для створення мікросередовища необхідно визначити тенденції розвитку галузі стосовно захисту довкілля, окреслити головні напрямки діяльності підприємства, пов'язані з впливом на навколишнє середовище, знайти і запровадити відповідні інноваційні екологічні технології, оцінивши попередньо конкурентоспроможність та економічний ефект.

Чинники макросередовища не залежать від суб'єкта господарювання, але визначають його виробничу та маркетингову діяльність. Необхідно відслідковувати і систематизувати особливості маркетингового макросередовища з метою пошуку нових можливостей розвитку та реагування на небезпеки [3]. Саме Стратегія розвитку внутрішнього водного транспорту України націлена на створення модернізованої та ефективної інфраструктури на внутрішніх водних шляхах, екологічного та енергоефективного флоту і кваліфікованого персоналу для роботи на ньому. Реалізації Стратегії посилить торгово-економічні міжнародні зв'язки, активізує вітчизняне суднобудування, дасть соціальний ефект у вигляді створення нових робочих місць та справить позитивний екологічний ефект, оскільки ВВТ є одним з найменш шкідливих видів транспорту для навколишнього середовища.

Мікросередовища екологічного маркетингу різних суб'єктів ВВТ суттєво відрізняються.

Так для суднобудівних підприємств, особливо таких, де є різноманітне устаткування для металообробки, зварки вузлів та секцій судна, електромонтажне устаткування і т. ін., головними є технологічні чинники, які визначають використання новітніх технологічних розробок, обізнаність і зацікавленість керівництва в запровадженні сучасних технологій з мінімальним впливом на довкілля та відповідну кваліфікацію і екологічну свідомість працівників.

На гідротехнічних спорудах внутрішніх водних шляхів особливими є чинники техногенного навантаження на надра. Створення водосховищ, будівництво гребель, транспортних каналів і водоводів, систем регіональних і локальних ставків, виробничих відстійників та інших споруд може порушити геологічне середовище, змінити режим грунтових вод, призвести до заболочення, забруднення підземних вод. Тому головну увагу потрібно приділяти природним та екологічним чинникам, застосовувати еко-технології та дбати про екологічну безпеку виробничої діяльності.

Річковий порт – це ділянка берега річки, суднохідного каналу, озера, водосховища з акваторією, захищена від негоди захисними гідротехнічними спорудами, на якій розміщується комплекс будівель та пристроїв для завантаження і розвантаження суден та їх обслуговування, споруд для зберігання вантажів. В загальному вигляді порт ділиться на сектори для різних вантажів – причали і прилеглі до них території (термінали). Причали мають під'їзні автомобільні і залізничні шляхи для перевантаження вантажів в автомобільний або залізничний транспорт. Спеціальні нафтові термінали обладнуються береговими сховищами для тимчасового зберігання нафтопродуктів та системою трубопроводів для транспортування нафтопродуктів. Існують спеціальні термінали для сипучих вантажів. Спеціалізація за видами вантажів дозволяє спрямовувати екологічний маркетинг на підбір оптимальних, з точки зору захисту навколишнього середовища, технічних елементів: технологічних процесів, перевантажувальних машин і механізмів, пристроїв. Необхідно вживати заходів щодо зменшення викидів пилу при перевантаженні сипучих вантажів. Окрему увагу потрібно приділяти портовим зонам з тиловими залізничними коліями, парками, стоянками автотранспорту, сховищами, майстернями і складами. Портові транспортні засоби (вантажопідйомники, обладнання для обробки вантажів, залізничні локомотиви) є основними джерелами забруднення повітря викидами оксиду азоту і діоксиду вуглецю [8]. Бажаною є

підтримка перевезень електричним транспортом та інтегрована екологічна політика (контроль забруднення повітря і шуму на транспорті). При експлуатації порту утворюються різні види відходів (осад з паливних резервуарів, утворені на борту суден відходи, стічні води). У відповідності до існуючої практики збору відходів [9] необхідно відстежувати наявність споруд для приймання суднових відходів, запроваджувати технології роздільного збору сміття на всіх технологічних ланках ВВТ.

Судноплавні компанії (судновласник) здійснюють завантаження та розвантаження різноманітних вантажів, буксирування суден і перевезення внутрішніми водними шляхами різного роду вантажів, а також пасажирів. Судновласник приймає на себе відповідальність за експлуатацію судна, обов'язки, що покладаються на нього Міжнародним кодексом по управлінню безпечною експлуатацією суден і запобіганням забруднення. Екологічний маркетинг з боку судновласника судна внутрішнього плавання має бути спрямований на забезпечення відповідності технічного стану суден встановленим законодавством вимогам для плавання на внутрішніх водних шляхах (за допомогою обраного судновласником класифікаційного товариства). Судновласники пасажирських суден, які не виконують міжнародних рейсів, повинні розробити, впровадити і підтримувати (в компанії і на суднах) систему управління безпечною експлуатацією суден та запобігання забрудненню.

Особливу увагу слід приділяти дотриманню правил перевезення внутрішнім водним транспортом небезпечних вантажів. Для міжнародних рейсів вони встановлюються міжнародними договорами України, а на внутрішніх водних шляхах такі правила розробляються і затверджуються центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері внутрішнього водного транспорту [9].

Вимоги та порядок підтвердження професійної компетентності перевізника внутрішнім водним транспортом та перелік навчальних дисциплін затверджуються центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері внутрішнього водного транспорту[2]. Професійна екологічна компетентність фахівців галузі має формуватися в профільних закладах вищої освіти. Наприклад, система компетентностей бакалавра спеціальності «101 Екологія» (Водний транспорт) визначається на основі стандарту вищої освіти, який затверджений наказом МОН України від 04.10.2018, №1076. Серед них слід звернути увагу на такі загальні і фахові компетентності:

– знання та розуміння теоретичних основ екології, охорони довкілля, зокрема, охорони водного довкілля та збалансованого природокористування;

– здатність до оцінки впливу процесів техногенезу на стан навколишнього середовища та виявлення екологічних ризиків, пов’язаних з виробничою діяльністю, зокрема, з експлуатацією водного транспорту;

– здатність до використання основних методів та складових екологічного управління;

– здатність до участі в розробці системи управління та поводження з відходами виробництва та споживання, зокрема, шкідливими відходами у процесі експлуатації водного транспорту;

– здатність до участі в управлінні природоохоронними діями та/або екологічними проектами.

Результатами навчання мають бути:

– уміння прогнозувати вплив технологічних процесів та виробництв, зокрема результатів експлуатації водного транспорту на навколишнє середовище;

– застосування базових управлінських принципів системи екологічної безпеки;

– розуміння ризиків непередбачуваних екологічних проблем і шляхів їх вирішення.

Ринок екологічних товарів і послуг на ВВТ можна поділити на такі складові:

– судна, побудовані згідно вимог технічних регламентів для модернізованого екологічного ВВТ, обладнання для боротьби з забрудненням повітря, утилізації відходів, енергозбереження, ліквідації нафтових розливів;

– технології, використання яких порівняно з традиційними аналогами є більш безпечним для природного навколишнього середовища (наприклад, перевезення на річкових суднах у порівнянні з перевезеннями автомобільним транспортом; вантажні операції в портах з використанням сучасного екологічного обладнання);

– підготовка фахівців, обізнаних в особливих вимогах захисту навколишнього середовища від забруднень при експлуатації ВВТ.

Ринок можна розглядати як простір, в якому суб'єкт ВВТ пропонує свій товар (послугу), який може конкурувати з іншими товарами (послугами) [3]. Наприклад, судновласник пропонує послуги перевезення вантажів економічними і екологічними суднами ВВТ у порівнянні з перевезеннями автомобільним або залізничним транспортом. І тут важливо звертати увагу не тільки на поточні показники продажу, а й на стратегічні перспективи становлення компанії в контексті сталого розвитку галузі і держави. Для просування екологічних товарів (послуг) необхідно вивчати досвід як прямих конкурентів, так і діяльність традиційних виконавців.

Основними рисами ринку екологічних товарів (послуг) на ВВТ є:

– механізм саморегулювання (взаємозалежність пропозиції, попиту і ціни на товар (послугу));

– функціонування інфраструктури ВВТ (виробників модернізованих екологічних типів суден; гідротехнічних споруд з мінімальним навантаженням на навколишнє середовище; портів з сучасними екологічними технологіями навантаження-розвантаження, захисту довкілля; судновласників «зеленого» флоту, навчальних закладів для підготовки кваліфікованих спеціалістів);

– необмежений доступ споживачів до типів суден і видів перевезень з можливістю вільного вибору між екологічними і традиційними товарами(послугами);

– конкурентна боротьба за споживачів між учасниками ринку (прийнятий Закон про ВВТ надає широкі перспективи).

Одним із завдань маркетингу є спонукання споживача до купівлі певного виду товару (послуги). На ринку екологічної продукції відчуття незадоволення споживачів станом довкілля, спричиненим антропогенною діяльністю людини, можна сприймати як мотивацію до покупки екологічних товарів (послуг). Так судновласник, зацікавлений у привабливості транспортних послуг, мотивовано буде формувати флот своєї компанії із сучасних суден з мінімальними показниками викидів в навколишнє середовище. Маркетинг виробника суден має бути спрямований на надання відповідної інформації щодо екологічності своєї продукції. Судноплавній компанії, в свою чергу, необхідно дбати про поінформованість споживачів послуг перевезень щодо своєї екологічної політики.

Висновки. В цілому, для суб'єктів ВВТ екологічний маркетинг є маркетингом природоохоронної діяльності з метою збереження навколишнього середовища і здоров'я населення, маркетингом екологічних знань та екологічно безпечних технологій, маркетингом екологічних послуг, обумовлених підвищеною екологічною свідомістю перевізників і пасажирів. Підготовка фахівців внутрішнього водного транспорту вимагає зосередження уваги на дотриманні правил захисту навколишнього середовища при експлуатації суден, гідротехнічних споруд, виконанні вантажних операцій в портах, поводженні з небезпечними вантажами і відходами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Водний транспорт URL: *https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html* ,дата звернення 18.10.2023

2. Закон України Про внутрішній водний транспорт *{Із змінами, внесеними згідно із Законами № 2247-IX від 12.05.2022*, *№ 2438-IX від 19.07.2022*, *№ 2849-IX від 13.12.2022}* URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2438-20#n210

3. Зіновчук Н. В., Ращенко А. В. Екологічний маркетинг : Навчальний посібник. – Житомир: ЖДУ ім. І. Франка, 2015. 190 с.

4. Садченко Е.В., Харичков С.К. Экологический маркетинг: понятия, теория, практика и перспективы развития / Е. В. Садченко, С.К. Харичков. – Одесса : ИПРЭЭИ НАН Украины, 2001. 146 с.

5. Сприяння транспортному розвитку річки Дніпро. Проєкт звіту «Аналіз річкових інформаційних служб на р. Дніпро, 5 травня 2020 https://ukrris.com.ua/upload/iblock/023/023b1ed18e982077e6c459174080ccdd.pdf

6. Стратегія розвитку внутрішнього водного транспорту України на період до 2031 року. Міністерство інфраструктури України URL:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi6-vexosSCAxV3h_0HHf4NBpoQFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fmtu.gov.ua%2Ffiles%2F%25D0%25A1%25D1%2582%25D1%2580%25D0%25B0%25D1%2582%25D0%25B5%25D0%25B3%25D1%2596%25D1%258F%2520%25D0%2592%25D0%2592%25D0%25A8.docx&usg=AOvVaw33CQBttHnuCiugGvkZrScU&opi=89978449

7. СЕО Стратегії розвитку внутрішнього водного транспорту України: позиція НЕЦУ URL:

https://necu.org.ua/pozycziya-naczionalnogo-ekologichnogo-czentru-ukrayinyshhodo-seostrategiyi-rozvytku-vnutrishnogo-vodnogo-transportu-ukrayiny-na-period-do-2031-roku-ta-planu-zahodiv-yiyi-realizacziyi-shhodo-seo-strat/

8. Аналітичні матеріали до проекту Стратегії розвитку внутрішнього водного транспорту України на період до 2031 року. EuropeAid/139464/DH/SER/UA , 15 вересня 2021. URL: https://mtu.gov.ua/

9. Правила запобігання забрудненню із суден внутрішніх водних шляхів України (Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України 13.08.2007 N 694)

10. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Наказ МОН України від 04.10.2018 р., №1076

REFERENCES

1. Water transport URL: https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html, date of application 10/18/2023

2. Law of Ukraine On Inland Water Transport {Amended in accordance with Laws No. 2247-IX dated 12.05.2022, No. 2438-IX dated 19.07.2022, No. 2849-IX dated 13.12.2022} URL: https://zakon .rada.gov.ua/laws/show/2438-20#n210

3. Zinovchuk N.V., Rashchenko A.V. Ecological marketing: Study guide. - Zhytomyr: ZhDU named after I. Franka, 2015. 190 p.

4. Sadchenko E.V., Kharychkov S.K. Ecological marketing: concepts, theory, practice and development prospects / E.V. Sadchenko, S.K. Kharichkov – Odesa: IPREEI of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2001. 146 p.

5. Promotion of transport development of the Dnipro River. Draft report "Analysis of river information services on the Dnipro River, May 5, 2020 https://ukrris.com.ua/upload/iblock/023/023b1ed18e982077e6c459174080ccdd.pdf

6. Strategy for the development of inland water transport of Ukraine for the period until 2031. Ministry of Infrastructure of Ukraine URL:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi6-vexosSCAxV3h_0HHf4NBpoQFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fmtu.gov.ua%2Ffiles%2F%25D0%25A1%25D1%2582%25D1%2580%25D0%25B0%25D1%2582%25D0%25B5%25D0%25B3

%25D1%2596%25D1%258F%2520%25D0%2592%25D0%2592%25D0%25A 8. docx&usg=AOvVaw33CQBttHnuCiugGvkZrScU&opi=89978449

7. SEO of the Strategy for the Development of Inland Water Transport of Ukraine: position of NETC URL:

https://necu.org.ua/pozycziya-naczionalnogo-ekologichnogo-czentru-ukrayinyshhodo-seostrategiyi-rozvytku-vnutrishnogo-vodnogo-transportu-ukrayiny-na-period-do-2031-roku-ta-planu-zahodiv-yiyi- realizaczyiy-shhodo-seo-strat/

8. Analytical materials for the draft Strategy for the Development of Inland Water Transport of Ukraine for the period until 2031. EuropeAid/139464/DH/SER/UA, September 15, 2021. URL: https://mtu.gov.ua/

9. Rules for the prevention of pollution from vessels of inland waterways of Ukraine (Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine dated 13.08.2007 N 694)

10. Standard of higher education in specialty 101 "Ecology" field of knowledge 10 "Natural sciences" for the first (bachelor's) level of higher education. Order of the Ministry of Education and Culture of Ukraine dated October 4, 2018, No. 1076

Lopatuk S.P.

FEATURES OF ENVIRONMENTAL MARKETING IN INLAND WATER TRANSPORT

With the entry into force of the Law «On Inland Water Transport», the development of a modern infrastructure of inland waterways with an ecological fleet is of particular importance. Although inland water transport is considered one of the cleanest types of transport, the deterioration of the environment leads to increased requirements for emissions of harmful substances to the atmosphere and water environment from ships, to the development of inland waterways, to the training environmentally conscious crews. Environmental marketing on inland water transport should play a significant role in this process.

The article considers types of environmental marketing for various objects of inland water transport. Attention is paid to the environmental competence of industry specialists.

Keywords: inland water transport, ecological marketing, marketing environment, market of ecological goods (services).

АВТОРИ ВИПУСКУ

Білоусов Євген Вікторович	–	д.т.н., професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, http://orcid.org/0000-0001-8185-8209
Богом`я Володмир Іванович	–	доктор технічних наук, професор, кафедра кібербезпеки, інформаційних технологій та економіки, Київський університет інтелектуальної власності та права, https://orcid.org/0000-0003-4403-3130
Болячевець Ярослав Юрійович	–	магістр кафедри інформаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0009-0007-4426-4146
Бондар Сергій Анатолійович	–	старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності Національного університету «Одеська морська академія».
Булгаков Микола Петрович	–	к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету; https://orcid.org/0000-0002-7172-8678
Бурлаченко Дементій Анатолійович	–	старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету; https://orcid.org/0000-0003-3749-4908
Войченко Тетяна Олександрівна	–	кандидат економіних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-0109-4622
Ганношина Ірина Миколаївна	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації та управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0001-5810-2462
Гаценко Лариса Володимирівна	–	здобувачка ступеня доктора філософії , Державний університет інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0003-1210-5726
Головань Андрій Ігорович	–	кандидат технічних наук, доцент, Одеський Національний морський університет, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, https://orcid.org/0000-0001-6589-4381
Гусак Ірина Леонідівна	–	здобувачка ступеня доктора філософії Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0002-1546-5914
Гончарук Ірина Павлівна	–	кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, https://orcid.org/0000-0002-5306-4206
Горалік Євгеній Тадеушевич	–	к.т.н., доцент, завідувач кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту Державного університету інфраструктури і технологій, https://orcid.org/0000-0003-2399-5373

Дакі Олена Анатоліївна	–	доктор технічних наук, професор, директор Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3932-462X
Давидов Володимир Семенович	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-4985-1143
Даниленко Олександр Борисович	–	доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри навігації і управління судном Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», https://orcid.org/0000-0002-5283-3368
Дзигар Анатолій	–	механік І розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія
Дубинець Олександр Іванович	–	доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
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». https://orcid.org/0000-0002-1613-7226
Заблоцький Юрій Вікторович	–	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія». https://orcid.org/0000-0002-6207-8802
Зазірний Андрій Андрійович	–	доктор філософії, старший викладач кафедри навігації і управління суднами, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0002-5780-4654
Заєць Анастасія Юріївна	–	кандидат технічних наук, доцент кафедри «Кафедра суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова»
Зінченко Дмитро	–	к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія
Іваненко Віталій Миколайович	–	старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3271-5257
Ісаченко Богдан Олександрович	–	Магістр кафедри інформаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0009-0000-7987-2220
Калініченко Євгеній Володимирович	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського Національного Морського Університету, https://orcid.org/0000-0003-2898-7313
Корякін Костянтин Сергійович	–	старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, https://orcid.org/0000-0003-2388-645X

Кочетов Геннадій	–	здобувач ступеня доктора філософії кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон
Кошарська Людмила Вікторівна	–	кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри суднобудування і судноремонт імені професора Ю.Л. Воробйова, https://orcid.org/0000-0001-5575-3745
Кліндухова Валентина Миколаївна	–	к.п.н., доцент, доцент кафедри вищої та прикладної математики Державного Університету Інфраструктури та Технологій, https://orcid.org/0000-0001-5561-2723
Крамаренко Вікторія Вікторівна	–	старший викладач кафедри навігації і управління судном, доктор філософії, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», https//orcid.org/0000-0003-0489-3937
Курносенко Дар'я Вікторівна	–	Херсонська державна морська академія, асистент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, http://orcid.org/0000-0003-3417-8766
Кучеренко Володимир Петрович	–	старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету; https://orcid.org/0009-0008-4906-9726
Лопатюк Світлана Петрівна	–	доцент, к.т.н., доцент кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-3669-6110
Лупіна Тетяна Олексієвна	–	старший викладач кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту Державного університету інфраструктури і технологій
Любарець Ігор Олексналрович	–	здобувач ступеня доктор філософії , Державного університету інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-1810-1435
Ляшко Ольга Володимрівна	–	к.т.н., професор, завідувачка кафедри вищої та прикладної математики Державного університету інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-2616-898X
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
Маслов Ігор Захарович	–	доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», https://orcid.org/0000-0003-1759-6077
Маранов Олександр Вікторович	–	доцент, кандидат технічн х наук, доцент кафедри навігації і упарілння суднами Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0002-5854-0240

Никифоров Юрій Олександрович	–	кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, професор кафедри суднобудування і судноремонт імені професора Ю.Л. Воробйова, https://orcid.org/0000-0002-8901-6935
Никитюк Петро Володимирович	–	старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, https://orcid.org/0000-0002-5905-3807
Носов Павло Сергійович	–	кандидат технічних наук, доцент, Херсонська державна морська академія, завідувач кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння, https://orcid.org/0000-0002-5067-9766
Постніков Євген Євгенович	–	здобувач ступеня доктор філософії кафедри «Навігація і керування судном»Одеський національний морський університет, https://orcid.org/0000-0001-7327-5353
Парменова Дана Георгіївна	–	доцент, кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», завідувач кафедри безпеки життєдіяльності, https://orcid.org/0000-0001-7794-8586
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
Сатулов Анатолій Іванович:	–	д.т.н., професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, http://orcid.org/0000-0001- 8185-8209
Сокол Альона Олекснадрівна	–	Херсонська державна морська академія, в.о. завідувача кафедрою безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної фізичної підготовки, https://orcid.org/0000-0002-8179-453X
Старцев Олексій Миколайович	–	старший викладач кафедри навігації і управління судном, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», 68601, м. Ізмаїл, вулиця Фанагорійська, 9, тел.: 0674880386, e-mail: startsevizm@gmail.com, https//orcid.org/0000-0001-7631-8902
Ткаченко Олександр Андрійович	–	К.ф.-м.н., доцент, кафедра інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0001-6911-2770
Ткаченко Ольга Іванівна	–	К.ф.-м.н., доцент, кафедра інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0003-1800-618X
Ткаченко Костянтин Олександрович	–	Кандидат економічних наук, доцент, кафедра інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0003-0549-3396
Олізаренко Сергій Анатолійович,	–	доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри, Льотна академія Національного авіаційного університету https://orcid.org/0000-0002-7762-6541

Савчук Володимир Петрович	–	к.т.н., доцент, Херсонська державна морська академія, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, http://orcid.org/0000-0002-5266-850X
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». http://orcid.org/0009-0008-4147-5172.
Сітков Олексій Михайлович,	–	старший викладач кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, https://orcid.org/0000-0002-9171-6674
Столярик Тимур Олександрович	–	аспірант кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія». https://orcid.org/0000-0002-2922-9728
Суворов Петро Семенович	–	доктор технічних наук, професор, професор кафедри суднових енергетичних установок і систем, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» https://orcid.org/0000-0002-5160-3966
Тарасенко Тетяна Владиславівна	–	Кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» https://orcid.org/0000-0001-8107-3524
Трофименко Ірина Валеріївна	–	доктор філософії, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій
Урум Наталія Степанівна	–	кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0000-0003-2493-9314
Червоний Олександр Дмитрович	–	старший викладач кафедри навігації і управління судном, капітан далекого плавання, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», , https//orcid.org/0000-0003-2539-5099
Чередик Володимир Миколайович	–	доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Державного університету інфраструктури та технологій https://orcid.org/0000-0002-2165-5394
Чимшир Валентин Іванович	–	доктор технічних наук, професор, директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», orcid.org/ 0000-0003-3621-2702
Шапран Юлія Євгеніївна	–	Кандидат технічних наук, старший викладач кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транпсорту, Державний університет інфраструктри та техноогій

Щенявський Геннадій Сергійович	–	старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету; https://orcid.org/0000-0001-7803-978X
Шиян Ярослав Анатолійович	–	магістр кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій, https://orcid.org/0009-0000-3958-4603
Шульга Юрій Миколайович	–	капітан далекого плавання, старший викладач кафедри навігації і управління судном, Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», https://orcid.org/0000-0003-4144-1956
Яремчук Світлана Олександрівна	–	кандидат технічних наук, доцент, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», доцент кафедри управління в транспортній галузі, м. Ізмаїл, https://orcid.org/0000-0002-6736-1471