Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції
Materials of the 15th international scientific and practical conference

СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА

SHIPS' ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND AUTOMATION

SEEEA-2025

Збірка матеріалів конференції

Свідоцтво № 609 про реєстрацію заходу в Державній науковій установі МОНУ
«Український інститут науково-технічної експертизи та інформації»

26 листопада
2025 року
Одеса, Україна

November 26
2025
Odessa, Ukraine

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Вадим Захарченко – д.т.н., професор (Україна);
Володимир Голіков – д.т.н., професор (Україна);
Віталій Будашко – д.т.н., професор (Україна);
Віктор Петрушин – д.т.н., професор (Україна);
Микола Муха – д.т.н., професор (Україна);
Ірина Гвоздева – д.т.н., професор (Україна);
Віктор Бушер – д.т.н., професор (Україна);
Сергій Михайлов –д.т.н., професор (Україна);
Віталій Кошевий – д.т.н., професор (Україна);
Всеволод Попов – д.ф-м. наук, професор (Україна);
Владислав Михайленко – д.т.н., професор (Україна);
Вадим Романюк – д.т.н., професор (Україна);
Юрій Гунченко – д.т.н., професор (Україна);
Світлана Кузніченко – професор (Німеччина);
Любомир Петришин – д.т.н., професор (Польща);
Раджендер Трехан – професор (Сполучені Штати Америки);
Віктор Філін – к.т.н., доцент (Бельгія);
Космас Здрозис – к.т.н., (Греція);
Хандакжи Камаль – к.т.н., (Йорданія);
Базил Шафик – к.т.н., (Сирія).

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова: **Вадим Захарченко** – в.о. ректора, проректор з НПР, д.т.н, професор.

Заступник голови оргкомітету: **Михайло Міюсов** – радник ректора, д.т.н., професор.

Члени оргкомітету:
Віталій Будашко – директор навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки, д.т.н., професор;
Віктор Савчук – начальник НДЧ, к.т.н., с.н.с., професор;
Валентин Чимшир – Голова Одеського відділення IMarEST, д.т.н., професор;
Володимир Торський – Почесний секретар Морського інституту України, к.т.н., професор;
Роман Харченко – завідувач відділу аспірантури та докторантури, к.т.н., доцент;
Тарас Омельченко – Голова ради молодих вчених НУОМА, к.т.н., доцент.

Відповідальний секретар: **Оксана Глазєва** – заступник директора Навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки, к.т.н., доцент.

М34 **Матеріали** міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – 216 с.

У збірнику матеріалів конференції розміщено тези доповідей XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», що відбулась 26 листопада 2025 року у Національному університеті «Одеська морська академія».

Тематика конференції охоплює наступні науково-методичні напрямки: енергозбереження в судновій енергетиці, технічна експлуатація сучасного електрообладнання та систем управління суден, енергоефективність та надійність електромеханічних систем, математичне моделювання процесів і явищ в енергетичних установках та електромехаічних системах, автоматизація суднових технічних засобів, менеджмент, логістика та транспортні технології, безпека судноплавства, педагогіка та освіта.

Матеріали публікуються згідно з поданими авторами оригіналами, які є відповідальними за їх зміст.

ISBN 978-617-7857-41-8

© Національний університет «Одеська морська академія», 2025

ЗМІСТ

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

Будашко В.В., директор ННІ АтаЕМ, д.т.н., професор **8**
ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ СУДНОВИХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Mezhuyev Vitaliy, Institute of Industrial Management, FH JOANNEUM University of Applied Sciences, Dr. of Science, Professor, Kapfenberg, Austria **16**
INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS AND NEXT-GENERATION MARITIME VESSEL NAVIGATION AUTOMATION

Petryshyn Lubomyr, Agh University of Krakow, Dept. of Enterprise Management, Dr. of Science, Professor, Krakow, Poland **17**
THE IMPORTANCE OF TRAINING MARITIME PROFESSIONALS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO ENHANCE NAVIGATION SAFETY AND OPERATIONAL EFFICIENCY

Секція 1. СУДНОВЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРОННА АПАРАТУРА ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Будашко В.В., Сочинський Д. Р. **18**
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМ КОМПЛЕКСОМ ОФШОРНОГО СУДНА НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ

Шевченко В. А., Очеретяний Ю.О., Романов А.М., Мунтян О.М., Табулінський І.М. **25**
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ ПАЛИВНИХ ВИТРАТ

Рябцов О.В. **35**
ЗАСТОСУВАННЯ П'ЕЗОЕЛЕКТРИЧНИХ БІМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ СУДНОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Гвоздева І.М. , Миргород В.Ф., Шевченко В.А., Чуйко Я.І., Крицький В.І. **38**
ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬ - ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Секція 2. **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Борса Є. В., Будашко В. В. **43**
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Найденко О. В., Берсеньова Н.М. **52**
НАДІЙНІСТЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У СИСТЕМІ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ ТА ВИМОГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Михайленко В.С., Лещенко В.В., Грама Г.П. **55**
АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ АГРЕГАТІВ СЕУ В ПРОЦЕСАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Муха М.Й., Дранкова А.О., Звєрьков Д.О. **58**
МОДЕРНІЗАЦІЯ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЇ СИСТЕМИ З ТЕХНОЛОГІЄЮ ШІМ

Дубовик В.О., Самонов С.Ф., Кульбацький А.В., Дудко С.А. **67**
ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДІЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУДНОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

Секція 4. **СУЧАСНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, КОМПОНЕНТИ ТА ДІАГНОСТИКА**

Опришко М. О. **68**
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛКОННОЇ ОПТИКИ, ЯКА ІНТЕГРОВАНА У КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Шестака А.І., Мельнікова Л.В. **77**
GaN і SiC: НОВІ МАТЕРІАЛИ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Секція 5. **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І ЯВИЩ В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

Попов В.Г., Кирилова О.І. **80**
МАТЕМАТИЧНЕМОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ В ТІЛАХ, ЩО МІСТЯТЬ ТОНКІ ЖОРСТКІ ВКЛЮЧЕННЯ

Пташенко Ф.О., Поповський О.Ю., Горюк А.А., Зенченко В.П. **84**
КІНЕЧНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ В ДІАПАЗОНІ УЛЬТРАВИСОКИХ ЧАСТОТ

Налева Г. В., Мазур О. М., Онищенко О. А. **88**
СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ШВИДКОДІЮЧОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ПЛАВАЛЬНОГО АПАРАТА

Кривий О.Ф, Морозов Ю.О. **92**
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІЖФАЗНИХ ЖОРСТКИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ З КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Секція 6. **РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА**

Shpinareva I.M., Strashnov V.V. **96**
A SURVEY OF WPA2 WEAKNESSES: PIXIE DUST, PMKID EXTRACTION AND KEY REINSTALLATION ATTACKS

Шишкін О.В., Пашенко О.Л. **100**
СКАСУВАННЯ НЕНАВМИСНОГО ЦИФРОВОГО СЕЛЕКТИВНОГО ВИКЛИКУ ЛИХА У ГМЗЛБ

Купровський В.І. **104**
ЦИФРОВА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ NAVDAT ЯК ЕЛЕМЕНТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГМЗЛБ

Шишкін О.В., Коновець В.І., Пашенко О.Л., Харченко Р.Ю. **109**
ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУДНОВИХ ПРИЙМАЧІВ ГНСС

Пашенко О.Л. **114**
ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ СПОВІЩЕНЬ (Return Link Service) В АВАРІЙНИХ РАДІОБУЯХ (EPIRB)

Борса Є.В., Михайлов С.А. **117**
ОГЛЯД ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН

Михайлов С.А., Чуйко Я.І. **122**
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІБЕРСТІЙКОСТІ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АВТОНОМНИХ СУДЕН

Михайлов С.А., Крицький В.І. **126**
МЕТОДОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КІБЕРБЕЗПЕКІ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН

Levinskyi M.V., Levinskyi V.M., Volovshchykov V.Yu. **131**
IMPROVING NETWORK TRAFFIC IN BANDWIDTH-RESTRICTED MILITARY INFRASTRUCTURES USING PI-HOLE

Секція 7. **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

Бушер В.В.,Захарченко В.М., Кравченко В.В. ***134***
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Яровенко В.О., Шумило О.М. ***137***
МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ ЕЛЕКТРОХОДІВ ПРИ МАНЕВРУВАННІ

Ткаленко О.С. ***141***
СИНТЕЗ НЕЙРО-ПІД РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ПОТУЖНОГО ДВИГУНА В МЕХАНІЗМІ З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Романець А.О. ***145***
КОМПЕНСАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ЗАВАД І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Харченко Р.Ю., Кочетков О.В. ***150***
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Гвоздева І.М. , Миргород В.Ф., Грама Г.П., Кольцов Г.С. ***154***
МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРУ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ТА ПРОБЛЕМИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Секція 8. **АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ**

Палагін О.М., Сандлер А.К., Глазєва О.В. ***158***
АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ МАС У БАЛАСТНИХ ТАНКАХ НАПІВЗАГЛИБНИХ СУДЕН

Михайленко В.С., Гунченко Ю.О., Лещенко В.В. ***165***
ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У МОРСЬКІЙ ГАЛУЗІ

Сандлер А.К., Глазєва О.В., Тимчинський Н.І. ***168***
ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сандлер А.К., Удолатій В.Б. ***174***
ЗАСІБ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У СУДНОВОМУ СКРУБЕРІ

Секція 9. **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

Разінкін Р.О. ***179***
ОГЛЯД СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВТУЛОК ЦИЛІНДРІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Куропятник О.А. ***184***
УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ДІОКСИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Удолатій В.Б. ***188***
АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ПОГЛИНАННІ ДІОКСИДУ СІРКИ У МОРСЬКИХ СКРУБЕРАХ

Секція 10. **НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ: ПОШУКИ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

Гунченко Ю.А., Мартинович Л.Я., Іванов О.О. ***194***
ДОСЛІДЖЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМАХ RTB

Секція 12. **БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА**

Veselovskyi B.M. ***199***
SAFEPILOT PRO WITH AI SUPPORT FOR MARITIME NAVIGATION SAFETY

Омельченко Т. Ю., Сандлер А.К., Катеринич І.О. ***201***
СТРАТЕГІЯ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Секція 13. **ПЕДАГОГІКА ТА ОСВІТА**

Дрозд О.В. ***206***
ЧИ КРОКУЄ ПРОХОДЖЕННЯ МОРСЬКОЇ ПРАКТИКИ В НОГУ З СУЧАСНИМИ МОДЕЛІМИ НАВЧАННЯ МОРЯКІВ

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ СУДНОВИХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Будашко В.В., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Розробка прибережного шельфу передбачає розвиток високотехнологічних наукомістких галузей морської індустрії, які передбачають будівництво та експлуатацію суден, призначених для проведення розвідувально-бурових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт в різних експлуатаційних умовах. Метою досліджень є параметрична оптимізація лінійно-квадратичного керування азимутальними підрулюючими пристроями (АПП), розташованими у кормовій частині комбінованого пропульсивного комплексу (КПК), що дозволить підвищити ефективність функціонування суднових енергетичних установок (СЕУ) КПК. Об'єктом дослідження є процес керування азимутальними підрулюючими пристроями транспортних засобів морського базування (ТЗМБ) із комбінованими пропульсивними акомплексами. Предметом дослідження є лінійно-квадратичний метод керування моделлю пропульсивного комплексу з АПП у кормовій частині.*

Ключові слова: *комбінований пропульсивний комплекс, підрулюючий притсрій, лінійно-квадратичне керування, моделювання.*

TRENDS OF THE DEVELOPMENT IN ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES FOR THE CONSTRUCTION OF SHIP COMBINED PROPULSION

Budashko V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *The development of the coastal shelf involves the development of high-tech science-intensive branches of the marine industry, which involve the construction and operation of vessels designed for exploration and drilling, lifting and transport and loading and unloading operations in various operating conditions. The purpose of the research is parametric optimization of linear-quadratic control of azimuthal thrusters (ATHs) located in the stern of the combined propulsion complex (CPC), which will allow to increase the efficiency of the operation of ship power plants (SPPs) of the CPC. The object of the research is the process of controlling azimuthal thrusters of sea-based vehicles (SBVs) with combined propulsion acomplexes. The subject of the research is the linear-quadratic method of controlling a propulsive complex model with ATHs in the stern.*

Keywords*: combined propulsion complex, thruster, linear-quadratic control, modeling.*

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

– на основі аналізу поведінки КПК та зусиль АПП у поєднанні з дослідженнями конструктивних особливостей суден подібного класу визначити відповідну математичну модель, що описує поведінку КПК із АПП у кормовій частині;

– на основі аналізу принципів моделювання та лінеаризації систем управління АПП та існуючих методів визначити форми простору станів та відстеження впливу збурюючих сил на характеристики контролера;

– виконати фізичне моделювання багатофункціонального КПК з АПП у кормовій частині;

– адаптувати математичну модель до алгоритму роботи контролеру та системи управління із відповідним тестуванням контролера за допомогою імітаційного моделю-

вання для перевірки можливості запропонованого методу та виконати аналіз результатів моделювання та можливих змін налаштувань контролерів.

В свою чергу, поставлені задачі неможливо вирішити без всебічного моніторингу деградаційних ефектів на лініях гребних потоків рушіїв із ідентифікацією відповідних маркерів на перетинах енергетичних потоків, розробки стратегії всережимних регуляторів потужністю, моментом та частотою обертання електродвигунами АПП КПК і методів побудови багатокритеріальних трирівневих стратегій управління розподілом потужності у СЕУ КПК [1, 2].

Процедура пошуку оптимального за параметрами контролеру, який може керувати судном з АПП у кормовій частині, зводиться до порівняння, за результатами моделювання, його роботи із реальними умовами. Для досягнення результату необхідно виконати наступні завдання, щоб отримати повніше уявлення про проблему:

– визначити математичну модель, що описує поведінку судна з АПП у кормовій частині в умовах неповної інформації;

– адаптувати отриману математичну модель для роботи у відповідності до алгоритмізації функціонування контролеру руху;

– провести фізичне моделювання з судна з АПП у кормовій частині;

провести імітаційні дослідження, які перевіряють можливості запропонованого методу.

Для вирішення основної проблеми основний метод був поділений на п’ять етапів:

– аналіз поведінки морських суден та зусиль АПП у поєднанні з дослідженнями конструктивних особливостей сучасних суден подібного класу;

– аналіз принципів моделювання та лінеаризації систем управління АПП на основі огляду існуючих методів;

– визначення форми простору станів та відстеження впливу збурюючих сил на характеристики контролера;

– тестування контролера за допомогою моделювання;

– аналіз результатів моделювання та можливих змін налаштувань контролерів.

Фізичне моделювання починається з визначення системи координат судна та того, як певні сили діють на судно у водному середовищі. Після цього пояснюється, як упори і обертаючі моменти АПП впливають на судно в залежності від кута і швидкості обертання. Потім ці математичні моделі об’єднуються для формування просторового вектору станів, у якому буде застосований регулятор. Потім описується, як працює *LQR* і як знайти оптимальний регулятор, використовуючи модель та рівняння Ріккаті. Також пояснюється, як вмикаються наступні дії регулятора в залежності від можливих змін експлуатаційних умов. Результати імітаційного дослідження із налаштуванням регулятора та контролера еталонних вхідних сигналів аналізуються у відповідності із досягнення бажаних результатів. Також під час моделювання досліджуються переваги вибору різних робочих точок для лінеаризації моделі для різних налаштувань регулятора.

Для визначення положення, орієнтації та швидкості руху ТЗМБ потрібні відповідні системи координат. Це рухома та нерухома системи координат, які визначені у рівняннях (1) та (2). Найбільш поширене уявлення для нерухомої системи координат базується на корпусній симетрії навколо X_bZ_b-площини, приблизної симетрії навколо Y_bZ_b-площини та проєкції на Z_b-вісь відносно поверхні води, як показано на рис.1. Інерційна (нерухома) система координат використовується для опису положення та орієнтації судна в глобальних координатах та кутах Ейлера, як $[x\ y\ z]^T$ та $[\phi\ \theta\ \psi]^T$, відповідно. Рухома система координат описує сили, крутні моменти, лінійні швидкості та кутові швидкості $[X\ Y\ Z]^T$, $[K\ M\ N]^T$, $[u\ v\ w]^T$, $[x\ y\ z]^T$, а також $[p\ q\ r]^T$ відповідно. Рух судна можна описати шістьма ступенями свободи, які поділяються на дві категорії: поступальний рух у трьох напрямках: поздовжнє переміщення (сплеск), поперечне переміщення (дрейф) і вертикальне переміщення (підйом), а також обертальний рух навколо трьох осей: бортова хитавиця

(крен), кільова хитавиця (тангаж) та нишпорення. Це стандартні позначення, які використовується при моделюванні морських суден [3].

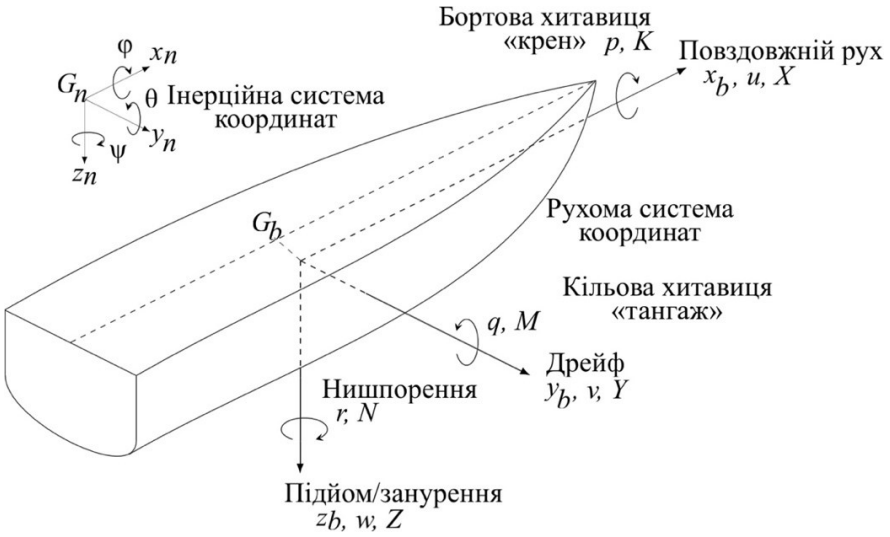


Рисунок 1 – Стандартні позначення опису руху судна у відповідності до (1) та (2)

Звичайне спрощення моделі полягає в тому, щоб знехтувати вертикальними рухами та поздовжньою хитавицею. Для отримання простої моделі кут крену також передбачається малим. Маючи це на увазі, вектор орієнтації положення і вектор лінійно-кутової швидкості можна визначити як:

$$\eta \triangleq \begin{bmatrix} x & y & \varphi \end{bmatrix}^T, \tag{1}$$

$$v \triangleq \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T. \tag{2}$$

Ці узагальнені положення та швидкості мають геометричну залежність, яку можна описати як:

$$\eta = J(\eta)v, \tag{3}$$

а рівняння руху судна в нерухомій системі координат мають вигляд:

$$M_{RB}v + C_{RB}(v)v + D(v)v = \tau_{act}, \tag{4}$$

де: M_{RB} – матриця інерції твердого тіла, $C_{RB}(v)v$ – представляє доцентрові та коріолісові члени, $D(v)$ – матриця демпфування, τ_{act} – вектор із узагальненими зовнішніми силами.

Спочатку для цієї простої моделі члени Коріоліса та матриця демпфування будуть апроксимовані лінійною функцією. Ця система рівнянь руху заснована на, а різні описи сил засновані на [*n*], де вивчаються моделі з чотирма ступенями свободи (де *roll* – це додатковий ступінь свободи), а не з трьох, як у нашому випадку. Що стосується трьох ступенів свободи, рівняння представляються у такому вигляді [4]:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & -y_G \\ 0 & m & mx_G \\ -my_G & mx_G & I_Z \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$C_{RB}(v)=\begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G r \\ mr & 0 & -my_G r \\ mx_G r & my_G r & 0 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$D(v)=\begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix}, \tag{8}$$

де повна маса судна приймається рівною m знаходиться $r_g = r_G = [x_G, y_G]$, а також I_z – момент інерції щодо осі z, виражений в b-системі. X_u, Y_v і N_r – масштабні коефіцієнти демпфування.

Оскільки $C_{RB}(\nu)$ залежить від ν, член $C_{RB}(\nu)\nu$ стає нелінійним. Однак використання *LQR* вимагає лінійної моделі. Таким чином, лінеаризація потрібна для спрощення моделі далі. Лінеаризація описується функцією:

$$L(x)=f(a)+f'(a)(x-a), \tag{9}$$

де $L(x)$ називається лінеаризованою функцією, $f(a)$ – функція, що підлягає лінеаризації оцінюється в a, $f'(a)$ є похідною $f(x)$ по x, оціненою в (a), в цьому випадку Якобіан функції $f(x)$. Нарешті, x – змінна лінеаризація (в цьому випадку v), a – обрана робоча точка. У цьому випадку лінеарізуючі члени рівні:

$$f(v)=C_{rb}(v)v=\begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G r \\ mr & 0 & -my_G r \\ mx_G r & my_G r & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y \\ v \\ r \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$f(v)=\begin{bmatrix} -mrv-mx_G r^2 \\ mrv-my_G r^2 \\ mx_G ru+my_G rv \end{bmatrix}, \tag{11}$$

які містять Якобіан:

$$J(v)=\begin{bmatrix} 0 & -mr & -mr-2mx_G r \\ mr & 0 & mu-2my_G r \\ mx_G r & my_G r & mx_G u=my_G v \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Для досягнення бажаної проектної поведінки системи необхідний процес ітераційного моделювання та коригування відповідно до поведінки регулятору, що спостерігається, щоб знайти оптимальне значення постійних коефіцієнтів. Контролер, визначений вище, скидає стан системи в нуль, але в цьому випадку контролер повинен слідувати заданому еталонному сигналу. Тому потрібно інтегрувати опорний сигнал r в рівняннях. Це можна зробити, переписавши вхідний сигнал як:

$$u(t)=-\boldsymbol{L}x(t)+\boldsymbol{L}_r r(t), \tag{13}$$

де $\boldsymbol{L}_r$ вибирається таким чином, щоб статичне посилення відповідало заданому значенню. Подібний метод використання *LQR* було застосовано в [5]. Розроблена за означеним принципом система показана на рис.2.

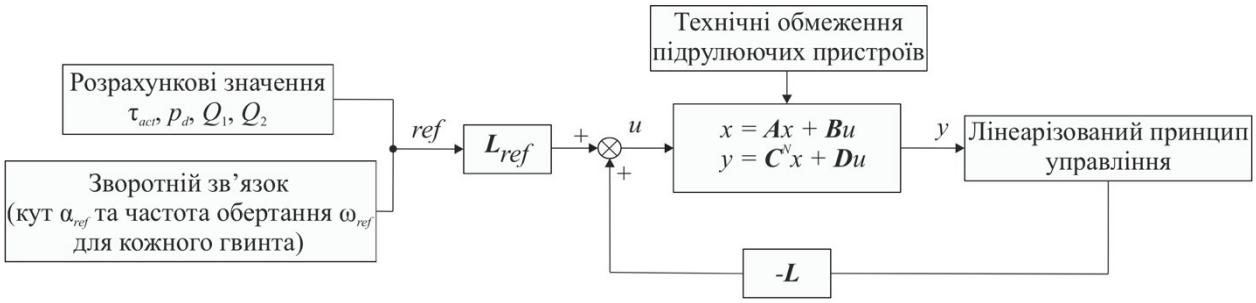


Рисунок 2 – Подання зворотного зв'язку та еталонного посилення системи

На рис. 3 показано основні результати роботи двох різних регуляторів. Регулятор налаштування максимального значення забезпечує перерегулювання в 7 разів вище еталонного значення, але стабілізується після 10 с.

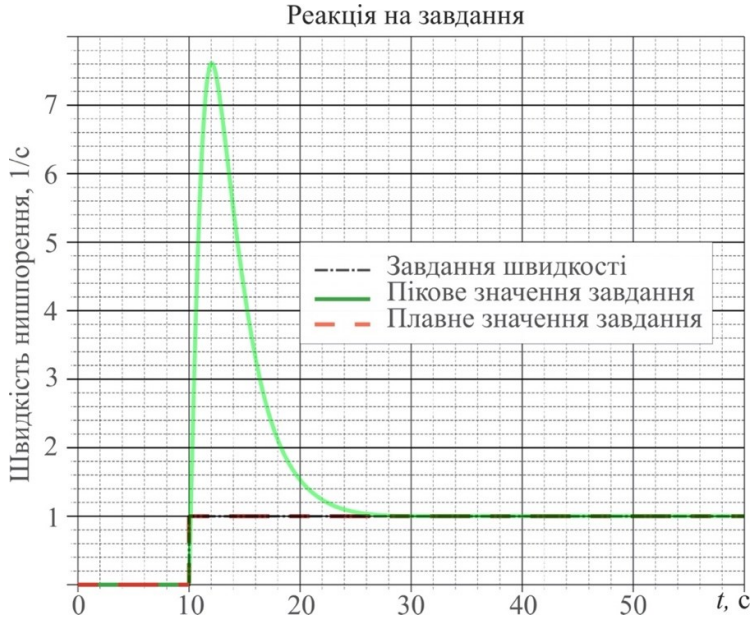
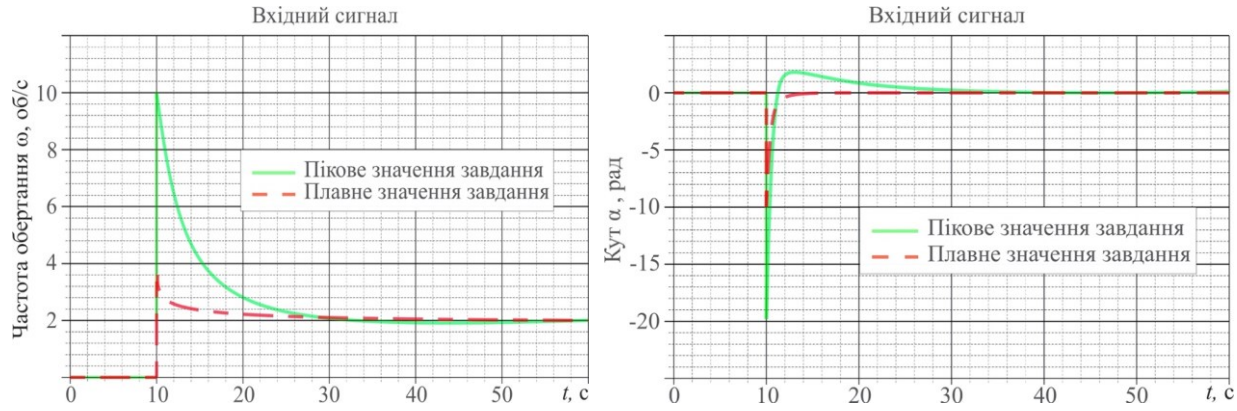


Рисунок 3 – Перехідна характеристика лінеаризації нульового кута

Згідно рис. 4, *б* кінцеве значення α дорівнює $\alpha_p=\alpha_s=0.065$ рад.



а *б*

Рисунок 4 – Вхідні сигнали лінеаризації нульового кута: *а* – швидкість обертання; *б* – кут α

Висновок

Удосконалення методу лінійно-квадратичного керування АПП пропульсивного комплексу судна полягало у визначенні просторів станів та лінеаризації системи керування, що дозволило адекватно моделювати швидкість нишпорення судна та відстежувати вплив збурюючих сил на характеристики контролера. Більше того, було виявлено, що малі від'ємні кути забезпечують позитивний крутний момент навколо осі z та позитивну швидкість нишпорення. Для врахування динамічних властивостей реальних АПП необхідно мати можливість регулювати зменшення та відновлення кута α до кінцевого стабілізованого значення. Також можна зробити висновок, що при застосуванні лінеаризації більше значення α відповідає більшому значенню результуючої сили, що на практиці не відповідає дійсності.

Перевірка поведінки моделі показала, що для отримання відносно адекватної перехідної характеристики з мінімальним перерегулюванням необхідно мінімізувати похибку стеження. Дослідження конструктивних особливостей суден цього класу підтверджують, що стрибки швидкості обертання АПП, які стабілізуються з постійним нульовим кутом, призводять до швидкої реакції на стрибок та відсутності перерегулювання. Малі кути розташування АПП відносно діаметральної площини судна призводять до того, що обом двигунам АПП потрібна менша швидкість обертання для забезпечення заданої тяги.

Для фізичного масштабного моделювання фізична модель АПП у кормовій частині може бути реалізована на основі виконавчих механізмів, електронно-комутованого двигуна та сервоприводу для кожного АПП. Електронно-комутований двигун з'єднаний з гвинтом АПП через зубчасті передачі. На практиці контролер використовує вхідні дані від *GPS* та *IMU* для визначення положення, курсу та швидкості судна. Для регулювання швидкості та крутного моменту електродвигуна необхідно вимірювати струми двигуна та розраховувати пропускну здатність перетворювачів з високою точністю. На практиці необхідно передбачити обмеження швидкості зміни крутного моменту, щоб запобігти пошкодженню механічної частини електроприводу.

Незалежне керування швидкістю та кутом АПП із лінеаризацією з нульовим або ненульовим кутом АПП довело свою більшу регульовану здатність, ніж синхронне. Для зменшення протидії двигунів АПП необхідно застосовувати узгоджену зміну величини кута α зі швидкістю обертання. А для компенсування відповідних сил необхідно регулювати швидкість обертання, створюючи від'ємний крутний момент навколо осі z. Підвищення точності лінеаризації можливе шляхом усунення зайвих протилежних сил у напрямку y_b.

ЛІТЕРАТУРА

1. Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi:10.20998/2074-272X.2017.2.10.

2. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:10.15587/1729-4061.2017.101298.

3. Budashko, V. V. Increasing control's efficiency for the ship's two-mass electric drive [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – №4. – P. 34 – 42. Doi:10.20998/2074-272X.2016.4.05.

4. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121)), 49–71. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934.

5. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., Budashko, V. Multiparameter Approximation Model of Temperature Conditions of Marine Diesel Generator Sets, Based on Markov Chain Monte Carlo [Text] / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, V. Budashko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea

Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 4. – P. 779-784. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: 10.12716/1001.16.04.20.

6. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V., Budashko, V., Golikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11 – 20. Doi:10.15587/1729-4061.2017.107244.

7. V. Budashko, A. Sandler and O. Glazeva, "Improvement of the Predictive Control Method for the High-Level Controller," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 294-297, Doi: https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755561.

8. Hvozdeva, I. Problems of Improving the Diagnostic Systems of Marine Diesel Generator Sets [Text] / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, V. Budashko, V. Shevchenko // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 350-354. Doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235453.

9. Budashko, V. Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, 16-18 Oct. 2018, Ukraine: IEEE. P. 106-108. Doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576266. Режим доступу: \WWW/ URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8576266. – 5.1.2019 р. – Загол. з екрану.

10. Budashko, V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading [Text] / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, V. Shevchenko, R. Kudelkin // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 35-39. Doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235588.

11. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179301.

12. Budashko, V. Main problems of creating energy-efficient positioning systems for multipurpose sea vessels [Text] / V. Budashko, T. Obniavko, O. Onishchenko, Y. Dovidenko, D. Ungarov // 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 20-23 Oct. 2020, KYIV, Ukraine: IEEE. Pp. 106-109. Doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255514.

13. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.225517.

14. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

15. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-Tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, I. Hvozdeva, V. Shevchenko, V. Myrhorod, A. Sandler, O. Glazeva // 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 22-26 Feb. 2022, Ukraine: IEEE TCSET 2022. – P. 7-14. Doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235588.

16. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.252172.

17. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: 10.12716/1001.16.01.11.

18. Furmanik, M. Low-Speed Sensorless Control for Six-Phase PMSM Based on Magnetic Anisotropy / M. Furmanik, D. Konvičný, P. Rafajdus // Transportation Research Procedia. – 2023. – V. 74. – P. 892-899. ISSN 2352-1465. Doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.222.

19. Budashko, V., Sandler, A., Khniunin, S., & Bogach, V. (2024). Design of the predictive management and control system for combined propulsion complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(2 (131), 90–102. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313627

20. Goor, van P. Constructive Equivariant Observer Design for Inertial Navigation / P. van Goor, T. Hamel, R. Mahony // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – V. 56. – I. 2. – P. 2494-2499. ISSN 2405-8963. Doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1229.

21. Hemalatha, N. Sensorless speed and position control of permanent magnet BLDC motor using particle swarm optimization and ANFIS [Text] / N. Hemalatha, S. Venkatesan, R. Kannan, S. Kannan, A. Bhuvanesh, A.S. Kamaraja // Measurement: Sensors. – 2024. – V. 31. – 100960. ISSN 2665-9174. Doi: 10.1016/j.measen.2023.100960.

22. Lang, X. A semi-empirical model for ship speed loss prediction at head sea and its validation by full-scale measurements / X. Lang, W. Mao // Ocean Engineering. – 2020. – V. 209. – 107494. ISSN 0029-8018. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107494.

23. Maidana, R. G. Risk-based path planning for preventing collisions and groundings of maritime autonomous surface ships [Text] / R. G. Maidana, S. D. Kristensen, I. B. Utne, A. J. Sørensen // Ocean Engineering. – 2023. – V. 290. – 116417. ISSN 0029-8018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116417.

24. Myrhorod, V. Multi-parameter Diagnostic Model of the Technical Conditions Changes of Ship Diesel Generator Sets [Text] / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, V. Budashko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, 21-25 Sept. 2020, Ukraine: IEEE. Pp. 1-5. Doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240905.

25. Myrhorod, V. Approximation-markov models of changes in the technical condition parameters of power and energy installations in long-term operation [Text] / Myrhorod, V., Gvozdeva, I., Budashko, V. // Aerospace technic and technology. – 2022. – V. 4 (I.2). – P. 73-79. Doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.11.

26. Nikolskyi, V. Parametrization and identification of energy flows in the ship propulsion complex [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin, M. Nikolskyi // *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 20-24 Feb. 2018, Ukraine: IEEE. – P. 288-294. Doi: 10.1109/TCSET.2018.8336205. Режим доступу: \WWW/ URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8336205. – 5.9.2018 р. – Загол. з екрану.

27. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.266267.

28. Budashko, V. V. Prospektive globale wissenschaftliche Trends: Modern technologies and concepts of researching for ship power plants of combined propulsion complexes: Monograph [Text] / V.V. Budashko // ScientificWorld-NetAkhatAV Lußstr 13, Karlsruhe, Germany in conjunction with Institute «SE&E», 2021. – Book 7. – Part 7. – 152 p. ISBN 978-3-949059-43-8 Doi: 10.30890/2709-2313.2021-07-07.

29. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773.

30. Sáez, D. Fuzzy Linear Quadratic Regulator Applied to the Real Time Control of an Inverted Pendulum [Text] / D. Sáez, A. Cipriano // IFAC Proceedings. – 1988. – V. 31, I. 4. – P. 155-160. ISSN 1474-6670. Doi: https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)42150-1.

31. Budashko, V. V. Ship's power plants of combined propulsion complexes: concepts, technologies, researching: Monograph / Budashko V. V.. – Odessa: NU “OMA”, 2020. – 136 p. ISBN 978-617-7857-01-2.

32. Nikolskyi, V. Development of a Computer System of Technical Condition for the Electric Podded Azimuth Thrusters [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin, M. Nikolskyi // Information technologies and computer modelling: proceedings of the International Scientific Conference May 14-19, 2018 Ivano-Frankivsk, Ukraine: Suprun V. P. – P. 157-160. ISBN 978-617-7468-26-3. Available at7: \WWW/ URL: http://itcm.comp-sc.if.ua/2018/zbirnyk.pdf.

INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS AND NEXT-GENERATION MARITIME VESSEL NAVIGATION AUTOMATION

Mezhuyev Vitaliy, professor, Doctor of Science
https://orcid.org/0000-0002-9335-6131
Institute of Industrial Management, FH JOANNEUM University of Applied Sciences,
Kapfenberg, Austria.

Introduction

The introduction of intelligent technologies into maritime vessel control systems is a key direction in the development of the modern maritime industry. The rapid growth of computing power, machine learning algorithms, and monitoring sensor systems creates prerequisites for transitioning from traditional control methods to adaptive and self-learning ones. In the context of increasing maritime transportation and rising requirements for safety, environmental sustainability, and efficiency, intelligent navigation systems are becoming the foundation of the industry's future.

Technology Overview

Current trends include the widespread implementation of multi-sensor complexes, the digitalization of onboard processes, the development of dynamic positioning systems, and the integration of AI algorithms into navigation solutions. There is also a shift from standard ship-parameter control systems to fully digital architectures, providing high accuracy and rapid data exchange between vessel subsystems and shore-based monitoring centers. These technologies form the basis of a “smart” vessel capable of autonomously assessing situations and making decisions.

Intelligent vessel control systems include algorithms for trajectory optimization, prediction of surrounding object behavior, and adaptive adjustment of movement parameters. The use of machine learning methods ensures continuous improvement of mathematical models based on data about weather conditions, currents, vessel traffic, and changes in route configurations. Particular attention is given to reducing crew workload and preventing human errors.

It should be noted that autonomous vessels require reliable systems for identifying vessel-object parameters and stable operation in conditions of limited communication with shore centers. The introduction of computer vision systems ensures timely decision-making by control systems. Sensor data is processed in real time using object recognition algorithms and trajectory prediction models. Intelligent data analysis systems create a comprehensive picture of the surrounding environment, enabling a vessel to operate safely even in poor visibility and challenging weather conditions.

The use of AI in navigation includes developments in the fields of deep learning and neural network forecasting. These technologies provide automatic selection of optimal routes, collision avoidance, and increased resilience to external disruptions.

It is also important to note that the increasing level of automation requires enhanced protection of vessel systems against cyber threats. Intelligent navigation and control systems must be resilient to attacks, ensure data integrity, and maintain secure information exchange between subsystems. The development of cybersecurity standards is becoming a crucial aspect of implementing autonomous vessels, especially amid growing digital dependence of transport processes.

Conclusion

Intelligent control systems and automated navigation are becoming the foundation for transforming global maritime transport. The development of AI technologies, sensor systems, cybersecurity solutions, and autonomous platforms opens possibilities for creating highly efficient, environmentally friendly, and safe next-generation vessels. Innovations in this field are establishing new standards for the maritime industry and shaping its long-term future.

THE IMPORTANCE OF TRAINING MARITIME PROFESSIONALS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO ENHANCE NAVIGATION SAFETY AND OPERATIONAL EFFICIENCY

Petryshyn Lubomyr, professor, Doctor of Technical Sciences
https://orcid.org/0000-0003-4168-3891
Agh University of Krakow, Dept. of Enterprise Management, Krakow, Poland,

Artificial intelligence (AI) is becoming a key element of modern navigation, monitoring, and vessel control systems. The expanding use of autonomous modules, forecasting systems, and intelligent assistants requires maritime specialists to understand the principles of AI technologies and to be able to interact with them effectively. Most maritime accidents are linked to crew errors. Training in AI tools enables seafarers to process information more quickly, respond to risks in a timely manner, and reduce the likelihood of critical mistakes. Knowledge of algorithms and the capabilities of automated systems increases trust in them and improves decision-making quality.

AI is used for route optimization, monitoring the technical condition of equipment, predicting malfunctions, and ensuring efficient fuel consumption. Understanding these technologies allows both crew members and shore-based specialists to effectively interact with automated systems, improving the economic efficiency of vessel operation. The integration of data from radars, lidars, cameras, and navigation systems into a single intelligent interface requires strong data interpretation skills. Specialists trained to work with AI modules can analyze complex information more quickly and make accurate decisions in challenging navigational conditions. The future of the industry is linked to the development of unmanned and partially autonomous shipping.

To remain competitive, maritime professionals must possess competencies in AI, neural network control systems, digital diagnostics, and big data analytics. AI systems increase the digital dependence of vessels, creating additional risks. Professionals must understand the fundamental principles of cybersecurity, methods for protecting AI modules from cyberattacks, and ways to prevent threats that may affect vessel safety.

High-quality training of specialists requires updating maritime educational standards, including courses on AI, modeling, machine learning, digital navigation systems, and data analysis. The use of AI-based simulators and training systems will increase the effectiveness of education. The transition to digital technologies stimulates demand for highly qualified personnel. Training in AI helps form a new professional mindset, enhances career opportunities, and contributes to attracting young people to the maritime sector.

Секція 1. СУДНОВЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРОННА АПАРАТУРА ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМ КОМПЛЕКСОМ ОФШОРНОГО СУДНА НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ

Будашко В.В., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
Сочинський Д. Р., здобувач другого рівня вищої освіти
https://orcid.org/0009-0006-2697-5721
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Одним із методів підвищення енергоефективності та точності автоматичного керування є впровадження математичних моделей розподілених у часі систем. За допомогою цих моделей можна передбачити поведінку системи, що забезпечує прогнозоване керування. Проблема полягає в тому, що якщо ці моделі недостатньо адекватно реалізують динаміку системи, цей метод може не вплинути на енергоефективність. Для вирішення проблеми адекватності моделей використовують методи оцінки динаміки системи в реальному часі із ідентифікацією системи, обробки сигналів і поєднання ідентифікаційних параметрів датчиків.*

У даній роботі досліджено можливості оцінки динаміки пропульсивного комплексу судна із єдиною електроенергетичною системою в різних експлуатаційних режимах. Математична модель, що описує динаміку судна, є моделлю "сірого ящика", яка базується на фізико-механічних співвідношеннях та поєднує в собі часткову теоретичну структуру з даними для завершення моделі. Теоретична структура може варіюватись від інформації щодо гладкості результату до моделей, які потребують лише значення параметрів з даних чи існуючих систем підтримки прийняття рішень. Тому, властивості таких моделей описуються невідомими фізичними величинами, такими, наприклад, як маса та момент інерції. Це означає, що при оцінці моделі будуть оцінені ці фізичні властивості.

Ключові слова*: моделювання, підрулюючий пристрій, оптимізація, комбінований пропульсивний комплекс, часткові режими*

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CONTROLLING FOR THE OFFSHORE VESSEL'S PROPULSION COMPLEX IN PARTIAL MODES

Budashko V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
Sochynskyi D., second-level graduate of higher education
https://orcid.org/0009-0006-2697-5721
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *One of the methods for increasing energy efficiency and accuracy of automatic control is the implementation of mathematical models of time-distributed systems. With the help of these models, it is possible to predict the behavior of the system, which provides predictive control. The problem is that if these models do not adequately implement the dynamics of the system, this method may not affect energy efficiency. To solve the problem of model adequacy, methods for assessing system dynamics in real time with system identification, signal processing and combination of sensor identification parameters are used.*

This paper investigates the possibilities of assessing the dynamics of a ship's propulsion complex with a single electric power system in different operating modes. The mathematical model describing the ship's dynamics is a "gray box" model based on physical-mechanical relationships and combines a partial theoretical structure with data to complete the model. The theoretical structure can vary from information on the smoothness of the result to models that only require parameter values from data or existing decision support systems. Therefore, the properties of such models are described by unknown physical quantities, such as mass and moment of inertia. This means that when evaluating the model, these physical properties will be estimated.

Keywords: *modeling, thruster, optimization, combined propulsion complex, partial modes*

Для системного підходу спочатку було розроблено середовище моделювання з моделлю судна з 4 ступенями свободи. Це середовище використовувалося для перевірки методів ідентифікації системи. Також була розроблена та формалізована фізична модель підрулюючого пристрою багатофункціонального пропульсивного комплексу судна, побудованого за принципом єдиної електроенергетичної системи. Методи оцінки адекватності поведінки судна були проаналізовані з використанням даних, зібраних під час моделювання [1-4].

Для ідентифікації системи та оцінки поведінки пропульсивного комплексу судна проаналізовано вплив шуму вимірювання та виявлення потенціальних змін динаміки [5]. Це було зроблено за допомогою оцінки адекватності моделювання методом Монте-Карло із різними реалізаціями шуму в моделюванні, щоб проаналізувати вплив недетермінованого довкілля на дисперсію та зміщення оцінок у невизначені зони [6]. Результати показують, що дисперсія та зсув сильно варіюються між параметрами і підтверджують, що навіть незначна зміна динаміки помітна в деяких оцінках параметрів на відносно невеликих проміжках оцінки даних [7].

У [8] був запропонований метод, заснований на кумулятивному підсумовуванні, який використовує так звані рекурсивні залишки, які виходять під час використання рекурсивного методу найменших квадратів, що забезпечило швидке та ефективне виявлення відхилень системи. Результати показують, що метод досить ефективний з надійним виявленням змін у динаміці приблизно через чотири хвилини збору даних. Вивчення самих рекурсивних залишків дозволив зробити висновки про стабільність параметрів моделі, оскільки математичне очікування їх за стабільності моделі дорівнює нулю, а стандартне відхилення стандартній помилці моделі.

Методи, запропоновані, наприклад у [9-12], були перевірені на даних, зібраних на реальномій фізичній моделі судна, що дозволило проаналізувати потенціал методів у реальних обставинах. Результати показали, що конкретні дані систем підтримки прийняття рішень не задовольняють для такого роду використання разом із деякими додатковими проблемами, які можуть призвести до погіршення результатів.

Метою досліджень є аналіз змін у динаміці судна із оцінкою властивостей, пов’язаних із його параметрами, за допомогою вимірювань.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

– на базі фізичної моделі (Рис. 1) побудувати номінальну імітаційну модель судна з системною багатофункціональною рушійною установкою, адаптованою для цілей управління, і порівняти її з динамікою даних реального судна;

– оцінити вибір параметрів, пов’язаних з динамічною моделлю судна, і перевірити її адекватність;

– розробити непараметричний ітераційний метод для ідентифікації змін у динамічній моделі в залежності від експлуатаційних режимів.

В цій статті розглядається система автоматичного керування та підтримки прийняття рішень, яка стосується єдиних електроенергетичних систем суден з комбінованими пропульсивними комплексами [13-15]. Три великі морські напрямки, де такі системи мають особливе застосування, це судна офшорного флоту, судна, які використовуються під час розвідки нафти та газу в морі, і судна риболовного флоту. Передбачається, що розвиток цих напрямків збільшать попит на більш передові технології з акцентом на безпеку судноплавства та економічно обґрунтовані рішення [16, 17].

Отримані рішення щодо вирішення проблем вдосконалення подібних систем керування та підтримки прийняття рішень, дозволять інтегрувати математичні моделі в контролери високого рівня для підвищення енергоефективності, продуктивності та точності. Недоліки подібних підходів пов'язані з недостатньою адекватністю моделей, що впливає на ефективність функціонування контролерів та, відповідно, обмеженість систем підтримки прийняття рішень щодо надання обґрунтованих рекомендацій [18, 19].

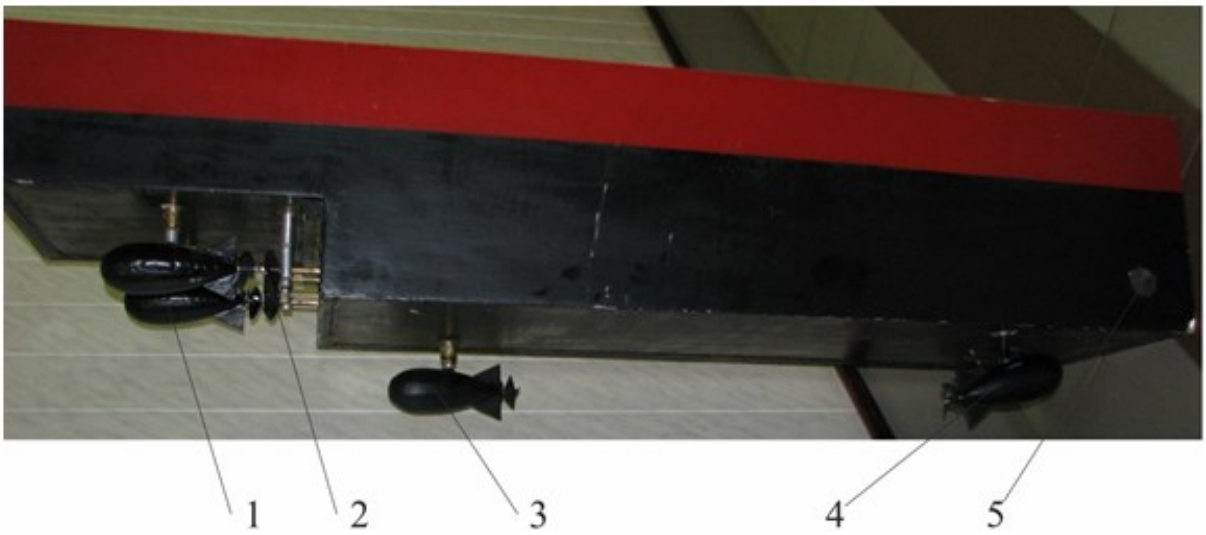


Рисунок 1 – Фізична модель судна зі змінною структурою: 1 – підрулюючі пристрої системи гвинтів протилежного обертання; 2 – головний електродвигун системи системи гвинтів протилежного обертання; 3 – кормовий підрулюючий пристрій; 4 – носовий підрулюючий пристрій з двома ступенями свободи; 5 – носовий тунельний підрулюючий пристрій.

Тому, основні аспекти подібних досліджень пов'язані, в першу чергу, із застосування обґрунтованих рекомендацій, заснованих на забезпеченні підвищення енергоефективності із використанням адекватних перевірених математичних моделей [20]. Оскільки параметри конкретного судна, такі як маса та центр тяжіння, змінюються в часі, наприклад, через особливості навантаження, це може призвести до помилок в наслідок використання моделей, незмінних в часі [21]. Розробляючи змінні у часі моделі, можна уникнути зазначених помилок, але в той же час створити нові проблеми. Одна з проблем стосується здатності вимірювати параметри судна та оновлювати їх у відповідній моделі під час руху. Для безпосереднього визначення багатьох параметрів судна недостатньо наборів датчиків або вимірювальних систем. Тому, для отримання необхідної інформації зазвичай використовують певний вид обробки даних датчиків.

Через складну взаємодію судна із довкіллям точне визначення динаміки судна є нетривіальним завданням, і одним із підходів для вирішення проблеми адекватності моделей, є використання методів ідентифікації системи та поєднання ідентифікаційних параметрів датчиків.

При цьому основна увага буде зосереджена на моделі з 4 ступенями свободи (повздовжнє переміщення, поперечне переміщення, бортова хитавиця (крен) та нишпорення), в якій не будуть враховуватися ані тангажні (кільова хитавиця, ані підйомні рухи (занурення). Параметри в імітаційній моделі базуються на багатоцільовому морському судні. Також в деяких експлуатаційних режимах, пов’язаних з певними технологічними процесами динамічного позиціонування, моделі спрощуються та не враховують такі параметри довкілля, як хвилі та вітер. У цих випадках оцінюються лише властивості, пов’язані з динамікою повороту судна, тобто модель, яка використовується для оцінки, є моделлю динаміки повороту судна. Коли мова заходить про оцінку моделі, основна увага буде зосереджена на впливі вимірювального шуму, без розгляду теорії, вибору методів оцінки та аналізу початкового значення оцінки параметра, що впливає на результат. У процесі оцінки передбачається, що сили та моменти від приводів підрулюючих пристроїв є відомими або такими, що розраховуються заздалегідь за відомими методиками.

Щоб мати можливість проаналізувати рух судна та те, як зміни властивостей впливають на динаміку, виконуються моделювання за допомогою Matlab Simulink із використанням найбільш адекватних моделей. За допомогою симуляції можна створити

спеціальні маневри та умови для удосконалення управління, оскільки можна застосувати методи оцінки динаміки симуляції у явному вигляді. Усі дані, які використовуються для аналізу оцінки властивостей і змін за певних умов у відповідності експлуатаційного режиму, отримуються за результатами моделювання.

По-перше, загальну динаміку повороту та те, як зміни впливають на рух, аналізуються за допомогою експериментів, що дозволяють отримати візуалізацію змін в даних руху. Використовуючи ці знання, за відповідною процедурою отримується непараметричний метод, який дозволяє упереджене виявлення змін у динаміці.

Оцінка властивостей судна виконується за допомогою моделювання "сірого ящика", як запропоновано в [22]. Для отримання ретельного аналізу виконується моделювання методом Монте-Карло та визначається вплив шуму на дані вимірювання на результати. Передбачається, що судно побудовано за технологією платформних силових установок із використанням комбінованих пропульсивних комплексів та проводиться аналіз деяких маневрів із припущенням, що упори та моменти ПП вимірюються або оцінюються, а вплив похибок для цих сил обговорюються.

На рис. 2 показано, як визначаються вектори ступенів свободи. Загальна маса судна дорівнює m, центр маси знаходиться в $r_g = [x_g, z_g]^T$, а I_x і I_z – момент інерції судна відносно осі x і z відповідно, усі виражені в рухомій системі координат, пов'язаній з судном. Вважається, що судно симетричне у напрямку у відносно діаметральної площини. Сили, що діють на систему, – це гідродинамічні сили ($\tau_{x,hyd}$), сили упору, що створюються підрулюючими пристроями тощо ($\tau_{x,act}$) і збурень навколишнього середовища внаслідок вітру, хитавиці та морських течій ($\tau_{x,env}$).

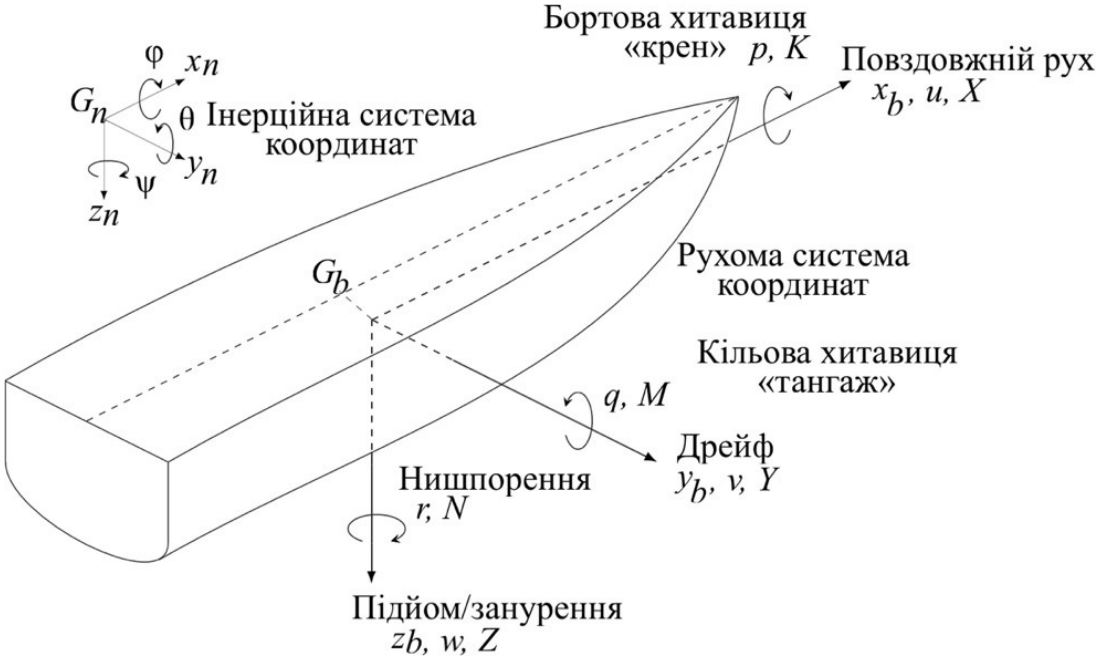


Рисунок 2 – Стандартні позначення опису руху судна у відповідності до фізичної моделі (рис. 1)

Для досягнення основної мети щодо енергоефективності управління, необхідно врахувати граничні параметри математичних моделей динаміки для оцінки енергоефективності маневрування.

Імітаційна модель судна на відкритій воді базується на оцінці фізичних властивостей, пов’язаних з динамікою судна, на етапі їх ідентифікації. Адекватно оціненою та широко використовуваною такою моделлю руху судна є диференціальні рівняння для 4 ступенів свободи [23, 24]:

$$\dot{\varphi} = p;$$

$$\dot{\varphi} = r\cos\varphi;$$

$$m(\dot{u} - vr + z_g pr - x_g r^2) = \tau_{u,hyd} + \tau_{u,act} + \tau_{u,env};$$

$$m(\dot{v} - ur + z_g \dot{p} - x_g \dot{r}) = \tau_{v,hyd} + \tau_{v,act} + \tau_{v,env};$$

$$I_x \dot{p} - mz_g(ur + \dot{v}) = \tau_{p,hyd} + \tau_{p,act} + \tau_{p,env};$$

$$I_z \dot{r} - mx_g(ur + \dot{v}) = \tau_{r,hyd} + \tau_{r,act} + \tau_{r,env},$$

які базуються на класичній теорії руху транспортного засобу морського базування (ТЗМБ) під впливом упорів підрулюючих пристроїв [25-27]. Ці рівняння показують перехресний зв'язок між 4 ступенями свободи, якими є повздовжній рух (u), поперечний рух або дрейф (v), крен (p) і нишпорення (r).

На рис. 3 показані результати дослідження роботи двох різних регуляторів із налаштуванням максимального значення перерегулювання, вище еталонного у 7 разів, із стабілізацією після 10 с.

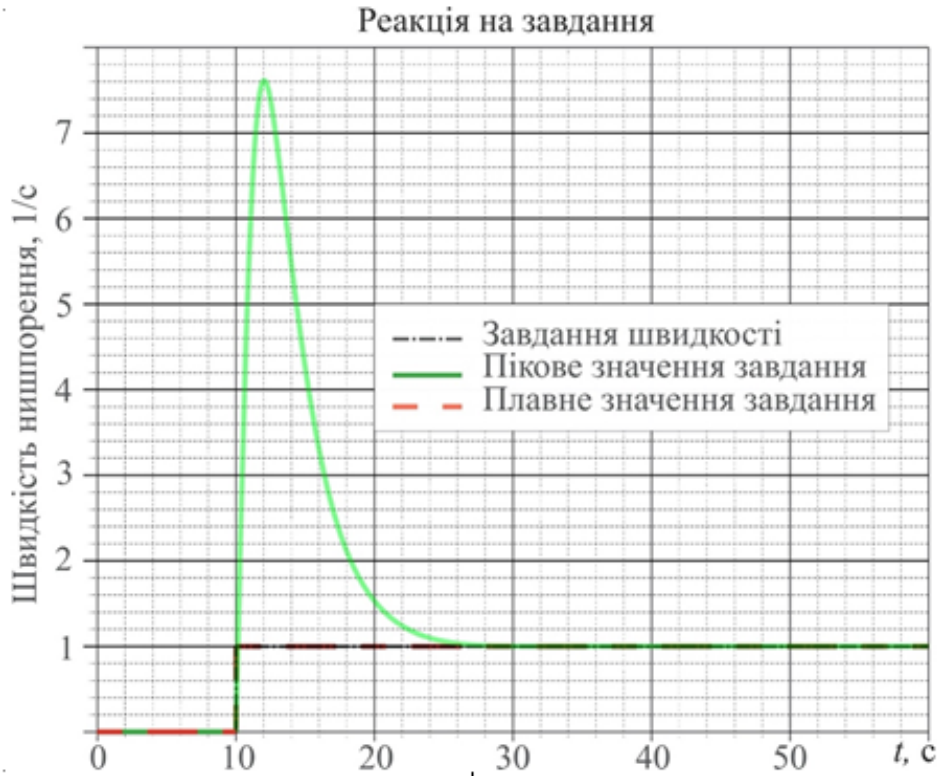


Рисунок 3 – Перехідна характеристика лінеаризації нульового кута

Факт стабілізації вказує на необхідність переоцінки більш різкої зміни швидкості повздовжнього руху на низькій швидкості із протидією умові, коли перевищення досягають високих значень. Але, зменшення кута α є доцільним, тому що малі негативні кути забезпечують позитивні крутні моменти навколо осі z та позитивні швидкості повздовжнього руху. Питання залишається дискусійним, в тому розуміння, чи можуть такі малі кути мати такий ефект, якщо нульовий кут дає адекватні результати для цього режиму роботи контролера. Ще одна дилема полягає в тому, що розділені швидкості обертання підрулюючих пристроїв та її стрибки відбуваються підчас однакової поведінки контролеру для обох симуляцій, що для реальних програмованих логічних контролерів суттєво впливає на кінцеві результати.

ЛІТЕРАТУРА

33. Andreas, A. Multivariate Modeling and Adaptive Control of Autonomous Ferries / A. Andreas, B. Morten, E. Bjørn-Olav // IFAC-PapersOnLine. – V. 54(16). – P. 395-401. Doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.122.

34. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:10.15587/1729-4061.2016.72543.

35. Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov // Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63–73. Doi: 10.15587/2312-8372.2016.81407.

36. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:10.15587/1729-4061.2017.101298.

37. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V., Budashko, V., Golikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11 – 20. Doi:10.15587/1729-4061.2017.107244.

38. Fossen, T. I. Identification of dynamically positioned ships [Text] / T. I. Fossen, S. I. Sagatun, A. J. Sørensen // Control Engineering Practice: 1999. – March. – P. 369–376. Doi:10.1016/0967-0661(96)00014-7, Marine Systems Simulator Режим доступу: \WWW/ URL: http://www.marinecontrol.org/. – 24.02.2015 р. – Загол. з екрану.

39. Gibson, J. D. Performance effects of optimal LQG eigenvalue placement in ship control [Text] / J. D. Gibson // IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468). – 2003. – V. 1. – P. 268-278. Doi: 10.1109/IECON.2003.1279991.

40. Lang, X. A semi-empirical model for ship speed loss prediction at head sea and its validation by full-scale measurements / X. Lang, W. Mao // Ocean Engineering. – 2020. – V. 209. – 107494. ISSN 0029-8018. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107494.

41. Wang, Z. A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment Control [Text] / Mechatronics // Z. Wang, U. Montanaro, S. Fallah, A. Sorniotti, B. Lenzo. – 2018. – V. 51. – P. 31-45. ISSN 0957-4158. Doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.01.013.

42. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773.

43. Budashko, V., Sandler, A., Khniunin, S., & Bogach, V. (2024). Design of the predictive management and control system for combined propulsion complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(2 (131), 90–102. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313627.

44. Frković, L. Shore-to-ship: Enabling the electrification sustainability of maritime transport with the nexus between berthed cruise ships and renewables in the isolated energy systems / L. Frković, B. Ćosić, A. Falkoni, T. Pukšec, N. Vladimir // Ocean Engineering. – V. 302. – 117537. ISSN 0029-8018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117537.

45. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

46. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: 10.12716/1001.16.01.11.

47. Atiz, A. Integrating renewable energy technologies in green ships for mobile hydrogen, electricity, and freshwater generation // A. Atiz, M. Erden, H. Karakilcik, M. Karakilcik // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – V. 89. – P. 1368-1382. ISSN 0360-3199. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.302.

48. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179301.

49. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.225517.

50. Liang, Q. A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective / Q. Liang, K. E. Knutsen, E. Vanem, V. Æsøy, H. Zhang // Ocean Engineering. – 2024. – V. 301. – 117619. ISSN 0029-8018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117619.

51. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // International journal of energy and environment. – 2020. – V. 14. – P. 5-8, ISSN: 2308-1007. Doi: 10.46300/91012.2020.14.2.

52. Guerrero-Rodríguez, N.F. Modelling real non-linear loads for a Controller Hardware-in-the-Loop configuration to evaluate a Shunt Active Power Filter / N.F. Guerrero-Rodríguez, V. Nuñez-Ramírez, R. O. Batista-Jorge, R. Mercado-Ravelo, F.A. Ramírez-Rivera, J. A. Ferreira, E. Reyes-Archundia // Energy Reports. – 2024. – V. 12. – P.1947-1976. ISSN 2352-4847. Doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.056.

53. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.252172.

54.Hänninen, Satu K. Development of vertical second harmonic wave loads of a large cruise ship in short and steep head waves / S. K. Hänninen, T. Mikkola, J. Matusiak // Ocean Engineering. – 2016. – V. 118. – P. 17-27. ISSN 0029-8018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.052.

55. Budashko, V. V. Ship's power plants of combined propulsion complexes: concepts, technologies, researching: Monograph / Budashko V. V.. – Odessa: NU “OMA”, 2020. – 136 p. ISBN 978-617-7857-01-2.

56.Будашко, В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія [Текст] / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко // Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 398 с. ISBN 978-617-7857-02-9.

57. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.266267.

58. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121), 49–71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934.

59.V. Budashko, A. Sandler and O. Glazeva, "Improvement of the Predictive Control Method for the High-Level Controller," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 294-297, Doi: https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755561.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ ПАЛИВНИХ ВИТРАТ

Шевченко В.А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-3229-1909
Очеретяний Ю.О., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0009-0002-5362-6915
Романов А.М., старший викладач
Мунтян О.М., ст. викладач
Табулінський І.М., ст. викладач
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *в роботі розглянуто рішення задачі підвищення ефективності управління електростанцією за критерієм мінімальної витрати палива з урахуванням метеоумов. Проаналізовано режими роботи електростанцій сучасних суден та їх середню завантаженість. Запропоновано вирази для визначення сумарного коефіцієнта надлишку повітря двигунів у судновій електростанції з урахуванням витрат вологого і сухого повітря, що визначаються за наведеними у роботі номограмами. Отримано вирази для визначення оптимального коефіцієнта надлишку повітря двигуна внутрішнього згоряння, що відповідає максимальному ККД. Розроблено алгоритми управління електростанцією з урахуванням мінімальної витрати палива шляхом варіювання коефіцієнта надлишку повітря і подачі палива. Проведені дослідження дозволяють встановити правила функціонування системи оптимального управління електростанцією при зміні навантаження, технічного стану генераторних агрегатів і умов навколишнього середовища.*

Ключові слова*: управління електростанцією, коефіцієнт надлишку повітря, синтез алгоритмів, витрати палива, оптимізація.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF POWER PLANT CONTROL BASED ON THE CRITERION OF MINIMIZING FUEL CONSUMPTION

Shevchenko V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0003-3229-1909
Ocheretianiy Y., Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0009-0002-5362-6915
Romanov A., Senior Lecturer
Muntian O., Senior Lecturer
Tabulinsky I., Senior Lecturer
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *the work examines the solution to the problem of improving the efficiency of power plant control based on the criterion of minimizing fuel consumption while taking meteorological conditions into account. The operating modes of modern ship power plants and their average load levels are analyzed. Expressions are proposed for determining the total air excess coefficient of engines in a ship power plant, considering the consumption of moist and dry air, as determined by the nomograms presented in the study. Expressions are obtained for determining the optimal air excess coefficient of an internal combustion engine corresponding to the maximum efficiency. Algorithms for power plant control are developed, taking into account minimal fuel consumption by varying the air excess coefficient and fuel supply. The conducted research makes it possible to establish rules for the operation of an optimal power plant control system under changing load conditions, the technical state of generator sets, and environmental conditions.*

Key-words: *power plant control, air excess ratio, algorithm synthesis, fuel consumption, optimization.*

Автоматизовані електроенергетичні системи, що експлуатуються на сучасних суднах, характеризуються низьким коефіцієнтом завантаження встановленої потужності [1,2]

і, як наслідок, невисокою економічністю, що пояснюється не тільки комплектацією електростанції, а й недосконалою організацією режимів роботи. Досі рішення таких завдань здійснюють, як правило, за допомогою наближених, а часто досить грубих способів [3-5], прагнучи більшою мірою до збільшення тільки одного критерію – резервування електроенергетичної системи (ЕЕС) в основних режимах роботи судна [6,7].

При розрахунку потужності і допустимих значень завантаження електростанції по режимах виходять зазвичай з усереднених або граничних значень некерованих змінних (запиту завантаження, температури, тиску, вологості середовища і т.д.), не враховуючи можливий діапазон їх зміни, що призводить до зниження техніко-економічних показників, про що свідчить ціла низка публікацій [8-10].

Розглянуті в [11] завдання управління електростанцією за принципом гнучких порогів завантаження викликають необхідність більш детального опрацювання питань оптимізації, пов'язаних з ресурсозбереженням та мінімізацією витрати палива [12]. Особливу увагу при цьому звертається на необхідність урахування метеоумов [13,14] у розрахунку верхніх рівнів завантаження дизелів, щоб уникнути їх термічних перевантажень. Відзначається [3,15] складний характер впливу метеоумов на робочі параметри дизелів, що відрізняються різноманіттям конструкцій. Граничне навантаження дизелів починає знижуватися при підвищенні температури навколишнього повітря більше 32°С, вологості більше 60% і зниження барометричного тиску нижче 101,3 кПа [16]. Вплив цих факторів у сучасних системах враховується вибірково, тоді як вони діють взаємопов'язано.

Наприклад, завод-виробник "Wartsila-Sulzer" [17,18] вказує в паспорті дизеля, що нормальними параметрами середовища є: атмосферний тиск 960 мбар (720 мм рт.ст.), температура повітря 20°С, вологість 70% і попереджає про те, що будь-яке відхилення цих величин, особливо температури повітря, що всмоктується і тиску може істотно змінити характеристики дизеля.

Найбільш характерними змінами при плаванні судна в тропічних умовах є зменшення потужності, збільшення питомої витрати палива і температури випускних газів, викликані зменшенням вагового заряду повітря і підвищенням його початкової температури [19].

Викликано це тим, що при зменшенні вагового заряду повітря ρ_k зменшується коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = k\eta_v\rho_k / g_ц$, де η_v - коефіцієнт наповнення циліндра, а $g_ц$ - циклова подача палива. У свою чергу зниження α викличе зменшення індикаторного η_i і, як наслідок, ефективного η_e ККД двигуна $\eta_e = f(\alpha)$. В результаті крутний момент дизеля $M = kg_ц\eta_e$ почне знижуватися, а регулятор частоти з метою стабілізації частоти струму почне збільшувати подачу палива $g_ц$, чим викличе перевантаження по середньому індикаторному тиску. При цьому температура випускних газів зростатиме. Надмірне підвищення температури випускних газів змушує судових фахівців зменшувати циклову подачу палива, що призводить до сумарного зменшення потужності ГА.

Проведені дослідження режимів роботи шестиагрегатної електростанції суден типу "HAI YANG SHI YOU 702" показали, що при плаванні судна в різних широтах, у тому числі і тропічній зоні, спостерігаються коливання метеоелементів в широкому діапазоні ($t^\circ = 20 \div 45^\circ C; \varphi = 60 \div 85\%; P_a = 750 \div 780$ мм рт.ст.), що призводить до зміни гранично допустимої, за умов допустимої, за умов 604 квт (на 18%). Часті коливання навантаження та параметрів середовища протягом доби роблять для обслуговуючого персоналу важко здійсненним рішення задачі оптимізації управління складом ГА. Тому, щоб уникнути ризику, щодо термічного перевантаження, доводиться тримати включеним досить великий запас генерованої потужності. Наприклад, в ходовому режимі замість можливих чотирьох діють, як правило, п'ять ГА, що тривало працюють при малих і середніх навантаженнях,

що призводить до зниження механічного ККД, і, як наслідок, зменшення ефективного $\eta_e = \eta_i \eta_m$ ККД.

Аналіз умов експлуатації двигунів електрогенераторів по транспортному флоту [20] показує, що середнє завантаження суднових електростанцій становить $30 \div 35\%$ загальної номінальної потужності генераторів. На суднах окремих типів дизель-генератори протягом майже всього робочого часу (90%) завантажено менш ніж на половину [21]. Тривала робота двигунів зі зниженим навантаженням призводить до відкладень на продувальних і вихлопних вікнах, клапанах, газотурбонагнітачах, вихлопних колекторах і трубопроводах, що знижує економічність двигуна. Відомі випадки виходу з ладу мотилевих та рамових підшипників двигунів через тривалу роботу на малих навантаженнях. На суднах типу DSV "Bar Protector" при роботі одного ДГ з навантаженням 270 кВт замість двох ДГ, що працюють паралельно з навантаженням менше 50% $N_{e\text{ном}}$ добова економія дизельного палива досягне 0,8 т, а циркуляційного масла 8-10 л при збереженні ресурсу ДГ.

Таким чином, усунення цих недоліків дозволило б в цілому по флоту отримати істотний техніко-економічний ефект.

Метою роботи приймемо розробку алгоритмів розрахунку і безперервного контролю допустимих навантажень дизелів, а також алгоритмів автоматичного регулювання параметрів роботи двигуна відповідно до змін параметрів середовища.

Міжнародним конгресом двигунобудування рекомендована методика, в основу якої покладено формули К. Циннера [22] при визначенні залежності зміни індикаторної потужності, де індикаторна потужність:

$$k = \frac{N_{i\,\text{т}}}{N_{i\,\text{н}}} = \left(\frac{D - P_{\text{П}}}{99}\right)^m \left(\frac{293}{T}\right)^n \left(\frac{293}{T_w}\right)^q$$

де $N_{iэ}$, N_{io} індикаторні потужності в поточних і нормальних умовах відповідно; D – барометричний тиск, кПа; $P_{П}$ – парціальний тиск водяної пари, кПа; T - температура повітря на всмоктуванні, ° К; T – температура води, що охолоджує, °К.

Парціальний тиск визначається за *i-d* діаграмою вологого повітря рис. 1, у функції температури та вологості середовища; показники ступеня *m, n, q* приймаються в залежності від нормальних значень сумарного коефіцієнта α_c надлишку повітря

$$m = \begin{cases} 0{,}1, \textit{ якщо } 1{,}7 < \alpha < 2{,}1 \\ 0{,}3, \textit{ якщо } \alpha < 1{,}7 \end{cases} \quad n = \begin{cases} 0{,}2\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } \alpha > 2{,}1 \\ 0{,}35\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } 1{,}7 < \alpha < 2{,}1 \\ 0{,}55\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } \alpha < 1{,}7 \end{cases} \quad q = \begin{cases} 0{,}2\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } \alpha > 2{,}1 \\ 0{,}3\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } 1{,}7 < \alpha < 2{,}1 \\ 0{,}6\,\eta_{\text{М}}, \textit{ якщо } \alpha < 1{,}7 \end{cases}$$

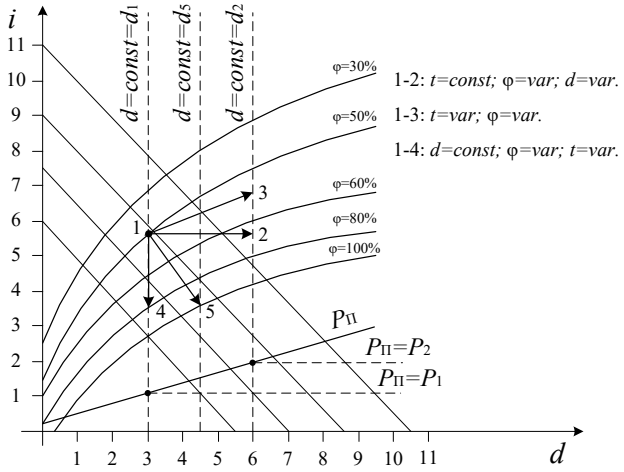


Рисунок 1 – Вплив зміни відносної вологості на парціальний тиск.

З урахуванням механічного ККД η_M коефіцієнт перерахунку k_{RCL} потужності визначатиметься формулою

$$k_{RCL} = (k - 0{,}7(1-k)/\eta_M - 1,$$

а допустима $P_{дi}$ потужність i-го ДГ виразом, $P_{дi} = k_{RCL} \cdot P_Н$, де $P_Н$ - номінальна потужність двигуна.

Розрахунки показують, що при зміні температури повітря від 27 до 62°С, значення змінювалися від 0,96 до 0,88, а при змінах трьох параметрів (T, D, j) - від 0,93 до 0,85. При цьому температура води, що охолоджує, змінювалася в межах 25...35°С.

Таким чином, нами встановлено закон визначення k_{RCL}, використання якого в алгоритмах роботи [11,23] надає гнучкість у породженні предикатів *PH(l)*, *PD(l)*, що у свою чергу дозволить експлуатувати ГА в зонах близьких до загороджувальних характеристик і тим самим підвищити коефіцієнт завантаження суднових електростанцій.

Тим не менш, можна запропонувати ще один із способів подальшого вдосконалення алгоритмів управління електростанцією шляхом підтримки оптимального режиму роботи двигуна, якщо в якості критерію оцінки режиму прийняти [16] постійність значення сумарного коефіцієнта надлишку повітря

$$\alpha_c - \alpha_{opt} \Rightarrow \min,$$

де α_c - поточне, α_{opt} - оптимальне для встановленого режиму роботи дизеля значення коефіцієнта, при якому досягається максимально можлива потужність при мінімальної витраті палива і допустимій температурі випускних газів. У суднових умовах сумарний коефіцієнт надлишку повітря можна визначити [16] за показаннями приладів, користуючись виразом

$$\alpha_c = A_1 \frac{P_S}{T_S G_T}\left(\frac{1}{1 + 1{,}61 d(i)}\right),$$

де A_1 - константа, що враховує конструктивні особливості дизеля, а також те, що добуток коефіцієнтів наповнення і продування можна вважати практично постійним; P_S і T_S - тиск і температура повітря в турбонагнітачі; G_T - витрата палива в одиницю часу; $d(i)$ – вміст вологості у повітрі у i-тому встановленому режимі.

Цей взаємозв'язок можна представити у вигляді номограми, рис. 2,

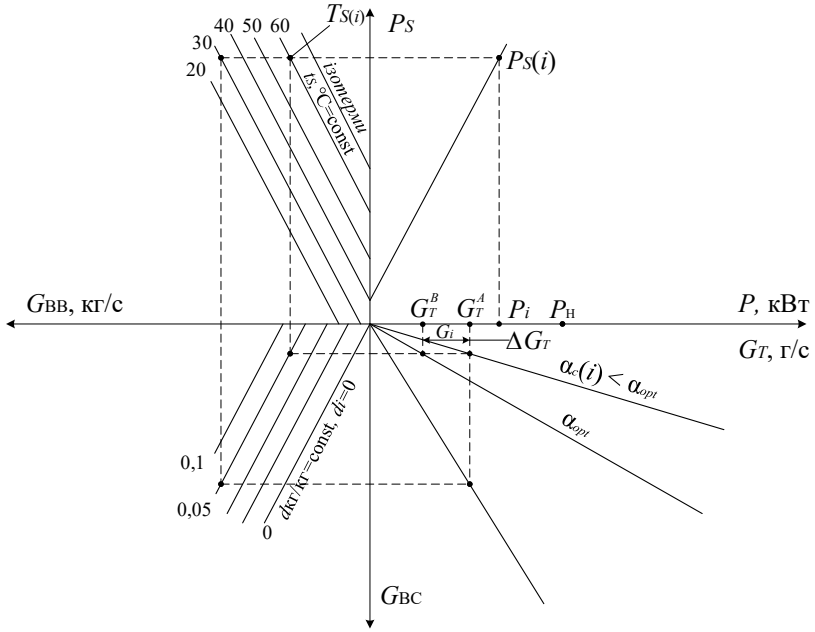


Рисунок 2 – Номограма взаємозв’язку вологого та сухого повітря.

де витрата вологого та сухого повітря пов'язані відношенням

$$\frac{G_{\text{ВС}}}{G_{\text{ВВ}}} = \frac{1}{1+1{,}61d_i}$$

Значення d_i знаходять за допомогою таблиць вологого повітря або *i-d* діаграми, рис. 1.

З номограми випливає, що якщо при навантаженні ДГ $P(i)$ і витраті палива G_T^A, інші робочі параметри будуть характеризуватися набором $\{P_S(i), T_S(i), d_i\}$, то сумарний коефіцієнт надлишку повітря буде $\alpha_c(i) < \alpha_{opt}$ менше оптимального значення, а витрата сухого повітря на $\Delta G_{\text{ВС}}$ менше норми, що погіршить процес згоряння і приведе до зростання температури випускних газів.

У цьому випадку регулювати режим роботи дизеля можна двома способами: зменшенням витрати палива на величину ΔG_T шляхом перерозподілу навантажень між паралельно працюючими ГА *PRSH* або підключенням накопичувачів *ONACC* або відключенням другорядних *OFCNS* для даного режиму споживачів; зниженням температури надувного повітря T_S за рахунок збільшення потоку охолоджувальної води в системі охолодження надувного повітря.

Слід зазначити, що зона $\alpha_c > \alpha_{opt}$ є також небажаною, оскільки збільшення α_c відносно оптимального призводить до погіршення процесу згоряння, збільшення втрат тепла з газами, що йдуть, і зменшенням індикаторного ККД.

Виконані дослідження дозволяють синтезувати структуру алгоритму оптимізації *PROPT* режимів роботи дизелів, якщо у якості умови прийняти, що система містить всі необхідні датчики $\{P_S, P_i, T_S, G_T, \varphi, t^{\text{г}}\}$ де φ - вологість повітря, $t^{\text{г}}$ - температура вихлопних газів, $\{SMW, SMF\}$ виконавчі органи (сервомотори) за допомогою яких можна керувати подачею води *SMW* для охолодження наддувного повітря та подачі палива *SMF*.

У якості способу організації роботи програми *PROPT* виберемо спосіб переривання з періодом дискретності $T_{\text{ЦО}}$ визначається динамічними властивостями системи охолодження наддувного повітря і дизеля, як двигуна внутрішнього згоряння.

Для полегшення процедури логічного програмування, представимо програму *PROPT* у вигляді сукупності *PROPT* = {*SBHTP, SBALF, SBSM, SBCNT*} підпрограм, а саме підпрограми *SB* контролю високої температури *SBHTP*, розрахунку відхилень коефіцієнта надлишку повітря *SBALF*, управління сервомоторами *SBSM* та розрахунку тривалості включення сервомотору *CNT*.

З урахуванням викладеного запишемо правила функціонування системи у вигляді наступних інструкцій з використанням підходу, прийнятого нами в [24-26]:

while $T_{\text{ТЦ}}$ *do PROPT,SBALF,SBHTP,SBSM,SBCNT od*
while SBALF do: $(t_i^{\text{г}} - t_{\text{доп}}^{\text{г}} = \Delta t^{\text{г}})$ *if* $\Delta t^{\text{г}} > 0$ *then HTP*
go to SBHTP else do: $(\alpha_c(i) = f(P_S, P_i, T_S, G, \varphi, \Delta\alpha_c(i) - \alpha_{opt})$
if $|\Delta\alpha_c(i)| > \Delta\alpha_{\text{доп}}$
then go to SBSM else fi od,

тобто. виконання підпрограми *SBALF* завжди починається з контролю температури випускних газів $t^{\text{г}}$ і, якщо вона вище норми (*HTP* = I), то здійснюється перехід до *SBHTP*, інакше проводиться розрахунок $\alpha_c(i)$ і порівняння його з оптимальним значенням α_{opt}, якщо при цьому відхилення вище допустимого, то перехід до *SBSM*, інакше кінець програми.

Підпрограма *BHTP* виконується за правилом:

while SBHTP do if HTP & $\overline{WVOPN}$ *then*
ONSMW(*INC*) *do* $B_W = f(\Delta t^{\Gamma})$ *go to SBCNT else if HTP*&*WVOPN*&*DCF then ONSMF*(*DEC*) *do*
$B_F = f(\Delta t^{\Gamma})$ *go to SCBNT*(B_F) *else fi od*,

тобто, якщо температура випускних газів вище норми (*HTP* = I) і клапан системи охолодження наддувного повітря повністю не відкритий $\overline{WVOPN}$, то: включається *ON* сервомотор *SM* у напрямку збільшення *INC* подачі охолоджуючої води *ONSMW*(*INC*); розраховується час його роботи B_W залежно від перевищення температури і здійснюється перехід до підпрограми відліку *SBCNT* часу роботи сервомотора. Якщо ж при підвищеній температурі газів клапан води виявиться повністю відкритим *WVOPN* і на верхньому рівні (рівні координатора) прийнято рішення *DCF* знизити температуру газів зменшенням подачі палива, то включається *ON* серводвигун *SMF* регулятора в напрямку зменшення подачі палива *ONSMF*(*DEC*), розраховується час його роботи B_F і здійснюється перехід до підпрограми відліку інтервалу часу *SBCNT*(B_F), інакше кінець підпрограми.

Інші $\{SBSM, SBCNT\}$ підпрограми повинні виконуватися за наступними інструкціями:

while SBSM do if $(\Delta\alpha_c(i) < 0)$ & $\overline{WVOPN}$ *then ONSMW*(*INC*) *do* $B_W = f(\Delta\alpha)$
go to SBCNT(B_W) *else if* $(\Delta\alpha_c(i) > 0)$ & $\overline{WVCLS}$ & $\overline{HTP}$)
then ONSMW(*DEC*) *do* $B_W = f(\Delta\alpha)$ *go to SBCNT*(B_W) *else if* $(\Delta\alpha_c(i) < 0)$ &
WVOPN&*DCF then ONSMF*(*DEC*) *do* $B_F = f(\Delta\alpha)$ *go to SBHTP else fi od*
while SBCNT(B_W) *do:*
if $(\Delta B_W(t+1) - 1(CNT) = 0)$ *then OFSMW else fi od*;
while SBCNT(B_F)
do: *if* $(\Delta B_F(t+1) - 1(CNT) = 0)$
then OFSMF else fi od,

тобто. при відхиленнях сумарного коефіцієнту надлишку повітря в ту чи іншу сторону від оптимального вмикаються у відповідному напрямку сервомотори, якщо є можливість регулювання, в іншому випадку, коли клапан вже повністю відкритий, регулювання здійснюється впливом на подачу палива, якщо є на це дозвіл координатора (*DCP* = I). При перевищенні температури випускних газів процес відправляється до підпрограми *SBHTP*.

Виконання підпрограм *SBCNT* здійснюється шляхом порівняння результату віднімання з залишку числа, що відображає величину часового інтервалу $\Delta B(t+1)$, одиниці 1(*CNT*), яка, як правило, еквівалентна тривалості основного такту $T_{\text{ТЦ}}$.

Підтримання оптимального режиму роботи кожного ДГ шляхом регулювання α_c певною мірою сприяє вирішенню завдання мінімізації витрати палива [27,28], так як для поточного значення навантаження система забезпечує не тільки нормальний тепловий режим дизеля, але і максимальний ККД, рис. 3.

Однак, в цілому по електростанції цільова функція сумарної витрати палива може не мати глобального мінімуму:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{I} F(i) \to \min, F(i) = g_e(i) P_{\text{Д}}(i), \qquad F_{\Sigma} = g_{e\Sigma} P_{\text{Д}\Sigma}; g_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^{I} \lambda(i) g_e(i);$$

де F_{Σ}, $F(i)$ - витрати палива за годину електростанції та *i*-го ГА; $g_{e\Sigma}$, $g_e(i)$ - питомі витрати палива електростанції та *i*-го ГА; P_{Σ} та $P_{\text{Д}}(i)$ – навантаження електростанції та *i*-го ГА; $\lambda(i) = P_{\text{Д}}(i) / P_{\Sigma}$ - частка навантаження *i*-го ГА.

Необхідною умовою існування мінімуму F_{Σ} є рівність нулю повного диференціала $dg_{e\Sigma}$:

$$dg_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^{l} \frac{\partial g_{e\Sigma}}{\partial P_{Д}(i)} dP_{Д}(i) = 0$$

Для отримання екстремуму функції $g_{e\Sigma}$ – необхідно так розподілити навантаження, щоб величини $\theta(i)$ кожного ГА у точках режиму мали рівні значення, тобто $\theta(1) = \theta(2) = ... = \theta(i) = ... = \theta(l)$, де

$$\theta(i) = \frac{\partial(P_{Д}(i) g_e(i))}{\partial P_{Д}(i)} = g_e(i) + P_{Д}(i) \frac{\partial g_e(i)}{\partial P_{Д}(i)}$$

Достатньою умовою оптимального розподілу навантаження є вимога мінімуму $g_{e\Sigma} \to \min$. Це достатня умова виконується при $d^2 g_{e\Sigma} > 0$.

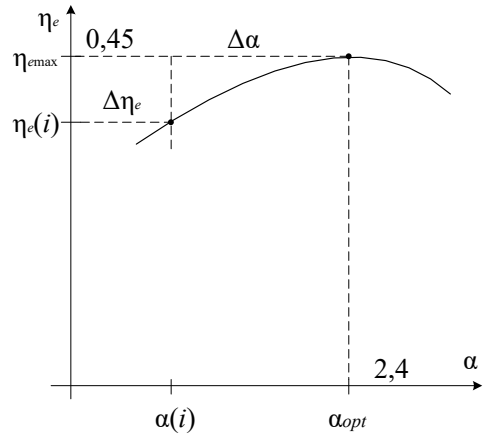


Рисунок 3 – Залежність ККД від коефіцієнту надлишку повітря при 65% навантаженні

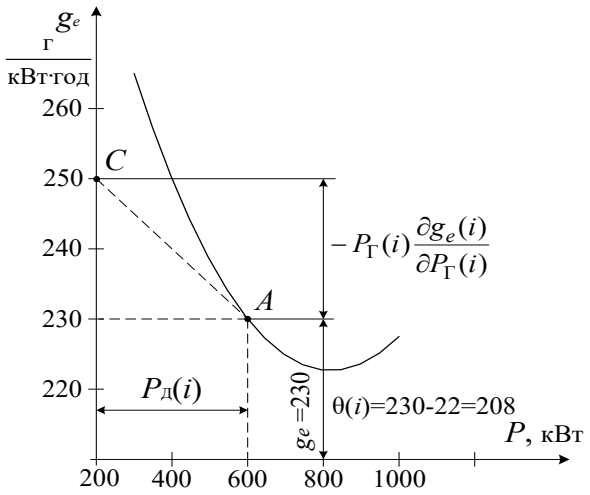


Рисунок 4 – До визначення параметру g_e

Якщо ГА мають однакові навантажувальні характеристики, то для виконання необхідної умови потрібно в точках режимів роботи електростанції розподілити навантаження рівномірно. Для виконання достатності необхідне виконання набору умов

$$\{2\frac{\partial \theta}{\partial P_{Д}(i)} > 0; 3\left(\frac{\partial \theta}{\partial P_{Д}(i)}\right)^2 > 0; ...; l\left(\frac{\partial \theta}{\partial P_{Д}(i)}\right)^{l-1} > 0\},$$

що можливо тільки в тому випадку, якщо всі похідні $\frac{\partial \theta}{\partial P_{Д}(i)}$ виявляться позитивними.

Цей висновок є дуже важливим, оскільки дає можливість розрахувати, за умов оптимальності нижні пороги завантаження електростанції, рис. 4.

У цьому випадку область роботи генераторів, рис. 5, обмежена допустимими межами може зрости, і її вираз матиме вигляд:

$$P_{PD} \le P_{Г}(i) \le (1 - \frac{\nu_1}{l}) P_{Д}$$

Проте в процесі експлуатації навантажувальні характеристики первинних двигунів, як правило, змінюються, що може призвести до суттєвого їх розкиду і постановки завдання оптимізації режимів роботи електростанції з урахуванням реальних навантажувальних характеристик.

Для вирішення задачі в такій постановці доцільно використовувати метод динамічного програмування, що забезпечує вибір найбільш ймовірного (квазіоптимального), для певної ділянки режиму роботи, складу ГА з дотриманням усіх обмежень.

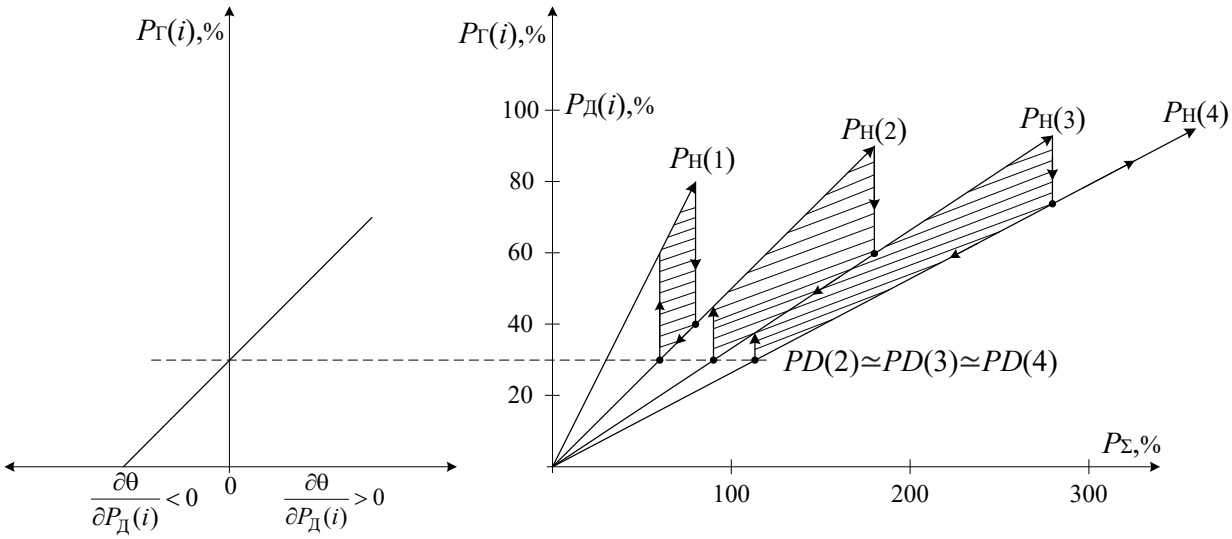


Рисунок 5 – Визначення припустимої нижньої межі навантаження електростанції за умови оптимального розподілу навантаження

Для виконання алгоритму динамічного програмування повинні бути побудовані еквівалентні характеристики $F_{\Sigma}^{E}(P_{\Sigma})$, які являють собою залежності мінімальної витрати палива агрегатів від їх сумарної потужності, тобто:

$$F_{\Sigma}^{E}(P_{\Sigma}) = \min\left\{F_i(P(i)) + F_{\Sigma-i}\left(P_{\Sigma} - Pi\right)\right\}$$

Таким чином, для кожного додаткового $P(i)$ знаходження $\min F_{\Sigma}^{E}(P_{\Sigma})$ зводиться до знаходження глобального мінімуму функції $F_i(P(i)) + F_{\Sigma-i}\left(P_{\Sigma} - Pi\right)$, який може бути визначений простим перебором. Одночасно з вибором складу ГА вирішується завдання оптимального розподілу навантажень.

Висновки. Виконані дослідження дозволяють встановити такі правила функціонування до алгоритму оптимального управління електростанцією при зміні навантаження, технічного стану ГА та умов навколишнього середовища:

1. Формування бази даних, що визначає кількість працюючих ГА, їх технічний стан, навантаження, витрату палива та параметри навколишнього середовища.

2. Аналіз навантажувальних характеристик агрегатів і формування бази даних для розрахунків з оптимізації режиму.

3. Визначення коефіцієнта перерахунку потужності k_{RCL} та коригування верхніх порогів завантаження з умов технічного стану та метеоелементів.

4. Коригування допустимих, за умов оптимального розподілу навантажень, нижніх порогів завантаження.

5. Визначення сумарного навантаження електростанції, аналіз еквівалентних характеристик витрати палива і вибір оптимального складу ГА за критерієм мінімуму витрат палива, а також з урахуванням обмежень відповідно верхніх і нижніх порогів завантаження.

6. Виконання операцій пуску, синхронізації, перекладу навантаження та зупинки ГА, пов'язаних з формуванням оптимального складу ГА.

7. Розподіл навантажень між паралельно працюючими ГА за умовами оптимальності $F_{\Sigma}\min(P_{\Sigma})$.

8. Виконання програми *PROPT* оптимізації первинного двигуна електростанції з реалізації критерію $(\alpha_c - \alpha_{opt}) \to \min$.

У процесі роботи електростанції в режимі, що встановився, або в період зміни складу за умов оптимального управління можуть виникати аварійні і передаварійні ситуації, викликані вибігом контрольованих параметрів за граничний рівень.

Для цих випадків повинні бути передбачені алгоритми формування команд на введення резервного та виведення аварійного ГА з урахуванням заданої черговості, розробці яких будуть присвячені подальші дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mukund R. Patel. Shipboard electrical power systems. CRC Press, 2012. 370 p.

2. Будашко, В. В. Координоване управління судновою автоматизованою електроенергетичною системою при змінах навантаження [Текст] / В. В. Будашко, В. А. Шевченко, С. О. Зеленюк, Д. І. Марфела // Results of modern scientific research and development Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2021. Pp. 109-116. Режим доступу: \WWW/ URL: https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskayakonferentsiya-results-of-modern-scientific-research-and-development-19-21-sentyabrya-2021-goda-madridispaniya-arhiv/. – 21.09.2021 р. – Загол. з екрану.

3. G. D. Rai, An Introduction to power plant Technology, 3rd edition, Delhi Khanna publishers, 1997.

4. Будашко В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. — Одеса: НУ «ОМА», 2020. — 398 с

5. Пипченко А. Н. Безопасная эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования: учебное пособие / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, А. Е. Савельев, В. А. Шевченко. – Одесса: ТЭС, 2008. – 260 с

6. Pipchenko, O.D., Tsymbal, M., Shevchenko, V. 2018.Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters.TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 12(3), pp. 567-571. DOI: 10.12716/1001.12.03.17

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

8. U. G. Kithsiri, N. S. Senanayake1, Ruchira Abeyweera, Jeevan Jayasuriya. A Model for Estimation of De-rating in Diesel Engines used for Power Generation. International Journal of Energy Engineering 2016, 6(2): 36-42. DOI: 10.5923/j.ijee.20160602.03.

9. Budashko, V., Sandler, A., Shevchenko, V. (2022). Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant-power hyperbole. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (8 (115)), 6–17. doi: https:// doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252172

10. Шевченко В. А. Синтез алгоритмов управления вало- и дизель-генераторными установками / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науч. -техн. сб., 2018. Вып. 2, С. 175–186.

11.Захарченко В. Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В. Н. Захарченко, В. А. Шевченко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб., 2015, Вып. 36, с. 74-82.

12.Шевченко В. А. Эксплуатация судовых технических комплексов с двигателями MAN B&W-ME: монография. – Одесса: ТЭС, 2019. – 400 с. ISBN 978-617-7711-21-5.

13.Pipchenko O.D., Tsymbal M., Shevchenko V., “Features of an ultra-large container ship mathematical model adjustment based on the results of sea trials,” TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 2020, 14(1), pp. 163-170. DOI:10.12716/1001.14.01.20

14.Шевченко В.А. Оптимизация управления электростанцией из условия минимума расхода топлива и с учетом метеоусловий // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 94–103.

15.Пипченко А.Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME: Учебное пособие / Пипченко А.Н., Пономаренко В.В., Шевченко В.А. – Одесса: ТЭС, 2014. – 325 с

16.Klaus Mollenhauer (Ed.), Helmut Tschoeke (Ed.) (2010). Diesel engine engineering hand book, Springer, ISBN-10: 3540890823.

17.Эксплуатация и ремонт одно- и двухтопливных двигателей производства Wartsila в энергетических установках морских транспортных средств: Монография / [Пипченко А.Н., Пономаренко В.В., Шевченко В.А., Табулинский И.Н.]. – Одесса: ТЭС, 2018. – 361 с.

18.Пипченко А. Н. Техническая эксплуатация одно- и двухтопливних двигателей Wartsila-Sulzer / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2017. – 338 с. ISBN 978-617- 7337-52-1.

19.Hindren A. Saber, Ramzi R. Ibraheem Al-Barwari, Ziyad J. Talabany (2013). Effect of Ambient Air Temperature on Specific Fuel Consumption of Naturally Aspirated Diesel Engine, Journal of Science and Engineering, Vol. 1(1), 1-7.

20.M. Morsy El-Gohary, Overview of past, present and future marine power plants, Journal of Marine Science and Application 12 (2) (2013) 219–227.

21.Budashko, V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading [Text] / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, V. Shevchenko, R. Kudelkin // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 35-39. Doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235588.

22.Циннер К. Наддув двигунів внутрішнього згоряння / К. Циннер ; пер. з нім. під ред. Н. Н. Іванченка. — К. : Машинобудування, 1978. — 280 с.

23.Шевченко В. А. Способ решения задач управления процессом пуска и остановки дизель-генератора в системах управления судовыми электростанциями / В. А. Шевченко // Наукові праці: науково-методичний журнал. Серія "Комп’ютерні технології". – 2018. – Вип. 305. – Т. 317. – Видав. ЧДУ ім. П. Могили. – С. 23-29.

24.Шевченко В. А. Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 21, с. 70-76.

25.Шевченко В. А. Способ верификации функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науч. -техн. сб., 2015, Вып. 1, с. 296-301.

26.Шевченко В. А. Алгоритм быстрой оценки параметров судовых электроэнергетических систем // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2018. – №3(244). – С. 136 – 141.

27.McCrone A. K. L., Diesel Plant Operator’s Hand Book, Pitman, ISBN-10: 0273409603.

28.Пипченко А. Н. Принципы построения и основы наладки контроллеров и систем автоматики: Учебное пособие / Пипченко А. Н., Пономаренко В. В., Шевченко В. А. – Одесса : ТЭС, 2010. – 592 с. ISBN 978-966-2389-15-9

ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ БІМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ СУДНОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Рябцов О.В., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-8259-7266
Національний університет «Одеська морська академія»

***Анотація**: в роботі розглянуто можливість вимірювання основних параметрів магнітного поля в зазорі потужних суднових асинхронних електродвигунів шляхом застосування п'єзоелектричних біморфних п'єзоелементів як вібраційних перетворювачів для індуктивних магніточутливих котушок в диференціальному включенні. Вимірювання параметрів поля в зазорі і, зокрема, визначення кута нахилу силових ліній поля по відношенню до нормалі дає можливість застосування додаткових контурів регулювання в системі керування електроприводом, а також розширює діапазон діагностичних вимірювань для оцінки стану двигуна.*

***Ключові слова:** магнітний проміжок асинхронного двигуна, п'єзоелектричні елементи, біморфний вібратор, індукційні котушки, диференціальне включення, система керування електроприводом, діагностика стану електродвигуна.*

APPLICATION OF PIEZOELECTRIC BIMORPHIC TRANSDUCERS FOR MEASURING MAGNETIC FIELD PARAMETERS IN THE AIR GAP OF MARINE INDUCTION MOTORS

Ryabtsov O.V., Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0000-0001-8259-7266
National University «Odessa Maritime Academy»

***Abstract:** This paper examines the possibility of measuring the main magnetic field parameters in the gap of powerful marine asynchronous electric motors by using piezoelectric bimorph elements as vibration transducers for magnetically sensitive inductive coils in a differential connection. Measuring the field parameters in the gap, and determining, in particular, the angle of inclination of the field lines relative to the normal, enables the usage of additional control loops in the electric drive control system and expands the range of diagnostic measurements for assessing the motor's condition.*

***Keywords:** magnetic gap of an asynchronous motor, piezoelectric elements, bimorph vibrator, induction coils, differential switching, electric drive control system, electric motor condition diagnostics.*

Постановка проблеми. Завдяки високій надійності та порівняно невисокій вартості асинхронні двигуни (АД) стали основним елементом сучасного суднового електроприводу. Однак, незважаючи на уявну простоту конструкції, в основу принципу роботи будь-якого електродвигуна закладені досить складні процеси електромеханічного перетворення енергії електромагнітного поля в обертальний рух, які описуються системою рівнянь Максвелла в приватних похідних [1]. Рівняння поля мають у загальному випадку безліч незалежних друг від друга рішень. Але у кожному конкретному випадку, який визначається режимом роботи АД, існує одна єдина на даний момент картина поля, яка описується відповідним математичним рівнянням, тому вибір єдиного правильного рішення, що задовольняє поставленому режиму роботи, повинен здійснюватися за допомогою точно відомих граничних умов. Складність точного математичного опису фізичних процесів, що відбуваються при взаємодії магнітних полів в електродвигунах, ускладнює процес управління АД, а також ускладнює пошук їх несправностей.

Актуальність задачі. Для точного математичного опису електромагнітних процесів у потужних суднових електродвигунах потрібно знати точні значення коефіцієнтів електромеханічного зв'язку, граничні та крайові умови та інші параметри, які досить складно точно визначити та математично описати. При цьому додаткові складності виникають у процесі практичної експлуатації, в умовах інтерференції, коли потужні електроприводи

встановлені на малих відстанях один від одного, в межах полів розсіювання, що взаємно перетинаються, особливо, на сучасних енергонасичених суднах при великій щільності установки електроустаткування. Тому при необхідності визначити якийсь конкретний параметр працюючого двигуна найчастіше вдаються до практичних вимірів. У зв'язку з цим створення нових технічних засобів для збору даних про режим роботи двигуна, вимірювання його поточних параметрів, управління ним та діагностичної оцінки його стану було і залишається актуальним науковим завданням.

Матеріали дослідження. Одним з параметрів, який дозволяє отримати зазначені дані про поточний стан суднового електроприводу, є магнітна індукція/напруженість поля в магнітному зазорі АД. Однак, для підвищення ефективності управління суднових електродвигуном, крім вимірювання взаємопов'язаних значень індукції і напруженості, виникає потреба у визначенні в зазорі відносних змін кута нахилу вектору магнітного поля відносно нормалі до полюса під дією механічного навантаження, прикладеного до двигуна, що дає інформацію про поточне значення ковзання. Інформація про ковзання ротора двигуна дає також можливість ввести в систему керування двигуном додатковий контур управління.

В даний час існує досить багато методів та пристроїв для вимірювання величини магнітного поля в довільній точці. До них відносяться методи прямого вимірювання, непрямі методи, метод Гаусса та інші. В якості магніточутливих елементів таких датчиків поля застосовуються як напівпровідникові елементи (датчики Холла, магніторезистори і магнітотранзистори), феромагнітні перетворювачі, а також традиційні дротові котушки індуктивності.

Загальним недоліком напівпровідникових та феромагнітних датчиків магнітного поля є нелінійність їх характеристик та інтермодуляційні спотворення, що призводять до появи додаткових частотних складових у вихідному сигналі датчика. Ці нові комбінаційні сигнали виникають як суми та різниці частот вихідних сигналів та їх гармонік, створюючи перехресні перешкоди, що погіршують якість вимірювального сигналу та знижують загальну точність вимірювального пристрою.

До того ж всі напівпровідникові елементи, чутливі до зміни зовнішнього поля, вимагають додаткових джерел електроживлення або модуляційної напруги, що ускладнює конструкцію вимірювального щупа, тому зупинимося на індукційному методі вимірювання, при якому в якості магніточутливого елементу використовується мікромініатюрна дротова котушка індуктивності. Як приклад можна навести пристрій, описаний у [2].

У цій роботі розглядається метод вимірювання параметрів магнітного поля, заснований на визначенні величини е.р.с., яка наводиться в багатовитковій котушці, що здійснює механічні коливання в заданої точки поля. Як відомо, величина $\boldsymbol{e}$ цієї е.р.с. , відповідно до закону Фарадея, буде пропорційна швидкості зміни магнітного потоку $\boldsymbol{\Phi}$, що перетинає площину котушки: $e = \dfrac{d\Phi}{dt}$.

Одним з можливих рішень при створенні пристрою для вимірювання параметрів магнітного поля в повітряному зазорі асинхронних суднових двигунів є використання механічних вібраторів високої частоти на основі п'єзоелектричних перетворювачів, які в силу ємнісного характеру їх внутрішнього імпедансу, не створюють власного магнітного поля, яке могло б спотворити результат вимірювань. Такі перетворювачі являють собою плоскі пластини, вирізані з природних кристалічних п'єзоматеріалів (наприклад, кристалів кварцу) або сформовані зі штучних п'єзоелектриків (наприклад, з титанату барію, цирконату-титанату свинцю або ніобату літію), у яких поздовжній розмір l_1 у багато разів перевищує їх ширину l_2 та товщину l_3.

Для нанесення на поверхні п'єзоелементів металізованих електродів, необхідних для їх підключення до електронних вимірювальних пристроїв, пластини покриваються електропровідним шаром (наприклад, порошком срібла), який потім впікається в матеріал пластини для забезпечення достатньої адгезії. Потім у п’єзопластинах створюється внутрішня поляризація, яка накопичується протягом кількох годин під дією зовнішньої напруги

від високовольтного джерела постійного струму і зберігається вних протягом багатьох років. Після чого пластини склеюються або спаюються попарно в поздовжньому напрямку вздовж довгої сторони, утворюючи двошарові п'єзоелектричні біморфні перетворювачі. Технологія їх виготовлення добре відпрацьована, докладно описана в літературі [3] та доступна навіть у суднових умовах.

Один кінець вібратора закріплюється на твердий опорі датчика поля (щупа), який вставляється в магнітний зазор АД, а на протилежному (рухомому) кінці п'єзоелектричного біморфа закріплюють магніточутливий елемент. Таким чином котушки розміщуються у точці, де амплітуда та швидкість коливань вібратора є максимальною.

Більшість відомих індукційних датчиків магнітного поля на базі п'єзоелектричних біморфних вібраторів дозволяє виміряти лише магнітну індукцію (або пропорційну їй напруженість поля) у точці розміщення датчика. Однак при дослідженні магнітного поля в зазорі АД важливою інформацією є не тільки величина, а й напрямок поля. Для вимірювання кута нахилу силових ліній магнітного поля в зазорі АД щодо нормалі до його полюсів можливе удосконалення чутливого елемента індуктивного датчика поля за рахунок застосування диференціального включення двох котушок індуктивності, як показано на рис.1.

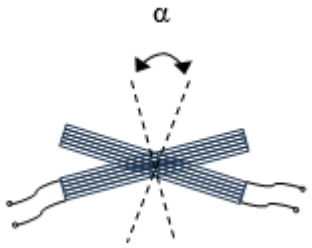


Рисунок 1 – Конструктивне розміщення індуктивних котушок для диференціального включення

Вихідний сигнал такого датчика при диференціальному включенні котушок міститиме інформацію не тільки про напруженість поля в даній точці, але і виявиться пропорційним синусу кута нахилу ліній магнітного поля в зазорі АД, відповідно до спрощеного виразу:

$$e(t) = k_0 k_н B_m \sin(\omega t)\sin(\theta + \alpha + 45^0),$$

де k_0 – емпіричний коефіцієнт пропорційності, залежний від конструктивних розмірів пристрою, $k_н$ – коефіцієнт неортогональності котушок, B_m – амплітудне значення індукції магнітного поля, що обертається в зазорі АД, ω - кругова частота механічних коливань п'єзовібратора, α – взаємний кут нахилу магніточутливих котушок.

Так як цей пристрій повинен повністю поміщатися в досить малий зазор електродвигуна, то розміщення двох котушок індуктивності строго ортогонально, тобто чітко під кутом 90° один до одного, представляє деяку конструктивну складність. Ця проблема вирішується взаємним закріпленням котушок під кутом більше 90°, як показано на рис.1. Збільшення кута нахилу котушок до значення (α + 90°) призводить до появи в рівнянні для е.д.с. додаткового коефіцієнта неортогональності $k_н$.

Висновки. Таким чином, вимірювальний перетворювач даного чутливого елемента з диференціальним включення котушок повинен мати два канали: один оброблятиме сигнал, одержуваний від одної з котушок, і перетворювати його в значення індукції (або напруженості поля) в даній точці, а другий – обробляти диференціальний сигнал від двох котушок, який є пропорційним куту нахилу магнітних ліній поля θ у даній точці зазору відносно нормалі до поверхні полюсів АД.

Даний пристрій може знайти застосування не тільки в дослідницьких цілях, але і стати основою для створення нових пристроїв управління векторними судновими АД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Москалюк В. О., Саурова Т. А. Теорія поля . – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40990/1/Teoriia_polia_pidruchnyk.pdf

2. Авторське свідоцтво № 1267308. Устрій для вимірювання напруженості магнітного поля / Рябцов О.В. ти інші. Опубл. 30.10.86. Бюл.№40.

3. Рябцов А.В. Застосування п’єзоелектричних актуаторів в якості згинальних дефлекторів для оптичних комутаційних пристроїв / А.В. Рябцов, Г.С. Гайворонська // Холодильна техніка і технологія. – Одеса. – ОДАХ, 2012. – № 6 (140). – С. 78-80.

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬ - ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Гвоздева І.М. , д. т. н., професор
https://orcid.org/ 0000- 0001- 5797- 0559
Миргород В.Ф., д. т. н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-8361-1672
Шевченко В.А., доктор технічних наук, професор
https://orcid.org/ 0000-0003-3229-1909
Чуйко Я.І., студент
Крицький В.І., студент

Анотація: *Пропонується підхід до удосконалення суднових електроенергетичних систем шляхом обґрунтування методики оцінки та прогнозу зміни технічного стану дизель-генераторних установок із застосуванням класичних методів трендового аналізу та нейромережевих технологій. Розглянуті характеристики сучасних методів оцінки та прогнозу технічного стану складних енергетичних об'єктів на основі аналізу часових рядів параметрів реєстрації та запропоновані напрямки їх удосконалення. Вирішено прикладне завдання статистичного аналізу та прогнозу зміни технічного стану дизель-генераторної установки балкеру за сукупністю параметрів, що фіксуються судновою SCADA на протязі довготривалої експлуатації. Встановлено за експериментальними даними, що застосування нейромереж регресії дозволяє отримати оцінки технічного стану та прогнозу його зміни за параметром температурного режиму з достатніми показниками точності та статистичної значимості.*

Ключові слова: *суднова електроенергетична система, дизель-генераторна установка, оцінка та прогноз технічного стану, нейромережеві технології.*

PROBLEMS OF ASSESSMENT AND FORECAST OF TECHNICAL CONDITION OF DIESEL GENERATOR UNITS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

Gvozdeva I.M., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/ 0000- 0001- 5797- 0559
Myrgorod V.F., Dr. of Science, Associate professor
https://orcid.org/0000-0001-8361-1672
Shevchenko V.A., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/ 0000-0003-3229-1909
Chuiko Y.I., Student
Krytsky V.I., Student

Abstract: *An approach to improving shipboard power systems is proposed by substantiating the methodology for assessing and forecasting changes in the technical condition of diesel generator sets using classical methods of trend analysis and neural network technologies. The characteristics of modern methods for assessing and forecasting the technical condition of complex energy facilities based on the analysis of time series of registration parameters are considered and directions for their improvement are proposed. The applied task of statistical analysis and forecasting changes in the technical condition of a bulk carrier diesel generator set based on a set of parameters recorded by shipboard SCADA during long-term operation is solved. It is established from experimental data that the use of neural networks of regression allows obtaining estimates of the technical condition and forecast of its changes by the temperature parameter with sufficient accuracy and statistical significance.*

Keywords*: shipboard power system, diesel generator set, assessment and forecast of technical condition, neural network technologies*

Вимоги, що пред'являються до сучасних суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) і, зокрема, до дизель-генераторних установок (ДГУ), створюють передумови переходу до стратегії їх експлуатації за прогнозним обслуговуванням.

Важливим питанням, що потребує дослідження та вирішення для отримання результативних пропозицій є достовірна оцінка технічного стану ДГУ та отримання прогнозу зміни такого стану для встановлення можливості подальшої експлуатації із забезпеченням техніко-економічних показників і безпеки для довкілля. Методи штучного інтелекту дозволяють виконати поставлене завдання і мають переваги у порівнянні із існуючими.

Звідси, для реалізації стратегії переходу обслуговування суднових систем за технічним станом і враховуючи можливості сучасної інформаційно-телекомунікаційних технологій, які здатні реалізувати більш досконалі методи та алгоритми технічного діагностування суднових ДГА, є актуальною проблема створення сукупності методів, методичних основ та програмно-алгоритмічних засобів оцінки та прогнозу технічного стану, які можуть бути застосовувані в системах технічного діагностування, що враховують моделі статистичного породжування даних та можливості нейромережевих технологій. Вирішення вказаної проблеми пропонується за допомогою встановлення взаємозв'язків діагностичних параметрів технічного стану суднових дизель-генераторних установок та побудови моделей цих взаємозв'язків, які з більшою адекватністю відповідають фізиці процесів в ДГУ, та побудові відповідних моделей породження даних і, на цій основі, створення програмно-інструментальних засобів оцінки поточного технічного ста та прогнозу його змін на протязі довготривалої експлуатації .

Таким чином має місце протиріччя між затребуваними практикою вимогами до систем діагностування та можливостями таких систем, що використовуються в СЕЕС.

Метою роботи є вирішення вказаного протиріччя між затребуваними практикою вимогами до систем діагностування та можливостями таких систем, що використовуються в СЕЕС, шляхом встановлення взаємозв'язків діагностичних параметрів технічного стану суднових ДГУ та побудови моделей цих взаємозв'язків, які з більшою адекватністю відповідають фізиці процесів в ДГУ, на протязі довготривалої експлуатації на основі сучасних нейромережевих технологій.

Для виконання функції контролю встановленими на судні системами моніторингу в режимі реального часу фіксується велика кількість електричних та механічних параметрів суднової електроенергетичної системи. Для вирішення завдання аналізу (і прогнозу) технічного стану ДГА доцільно вибрати лише найбільш інформативні параметри. Велика кількість параметрів призводить з одного боку до більш деталізованої моделі, а з іншого боку – до збільшення ознакового простору технічного стану ДГА та до ускладнення розрахунків за обраною моделлю. Таким чином, першим завданням став відбір числа діагностичних параметрів, необхідного і достатнього для технічного діагностування ДГА. Вибір діагностичних параметрів був здійснений за критерієм інформативності.

Слід мати до уваги, що основною причиною зміни технічного стану ДГУ є зміна навантаження. Тому саме така залежність має визначне значення для встановлення відповідності технічного стану ДГУ вимогам щодо експлуатації та можливостей прогнозування зміни такого технічного стану.

Обрання параметрів технічного стану ДГУ із сукупності даних реєстрації дає змогу встановити шукувану залежність. Таким статистично обґрунтованим критерієм є значення коефіцієнту взаємокореляції сукупності параметрів реєстрації технічного стану ДГУ відносно параметру навантаження.

На рис. 1 представлено значення коефіцієнтів взаємокореляції параметрів ДГУ в залежності від навантаження.

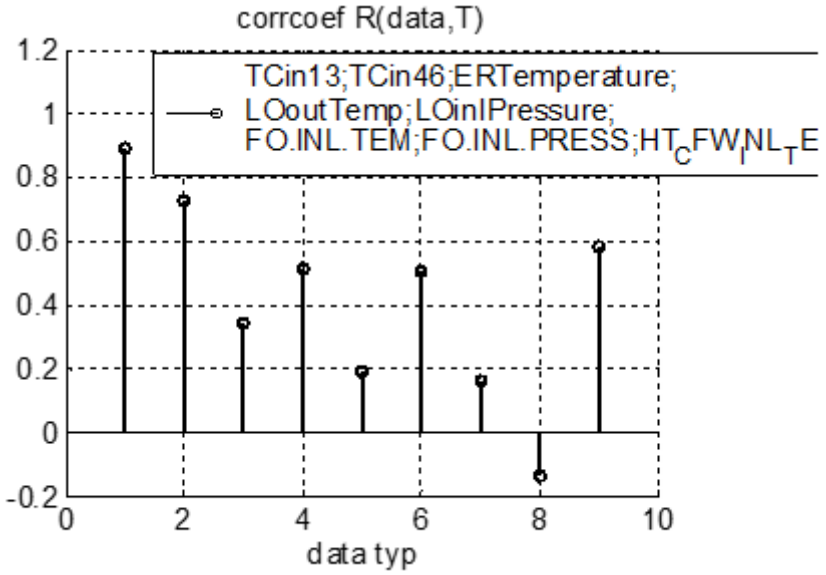


Рисунок 1 – Вихідні дані для статистичного аналізу

У якості основного діагностичного параметра, згідно статистичного аналізу, обрана температура вихідних газів. Температура вихідних газів є опосередкованим показником теплонапруженості та розподілення навантаження між циліндрами дизельного двигуна.

Для візуалізації даних експерименту були побудовані графіки відібраних для дослідження параметрів (температура вихідних газів циліндрів № 1– № 5 (рис. 2), сила струму навантаження (рис. 3). Коефіцієнти взаємокореляції температури газів та струму по циліндрам ДГУ наведені на рис. 4, що підтверджує вихідну гіпотезу. Регресійні моделі температури газів та струму ДГУ представлені на рис. 5. Прогноз температури газів ДГУ за циліндрами ілюструють діаграма рис. 6. Межі допуску температури газів ДГУ (за методикою Kongsberg) наведено на рис. 7.

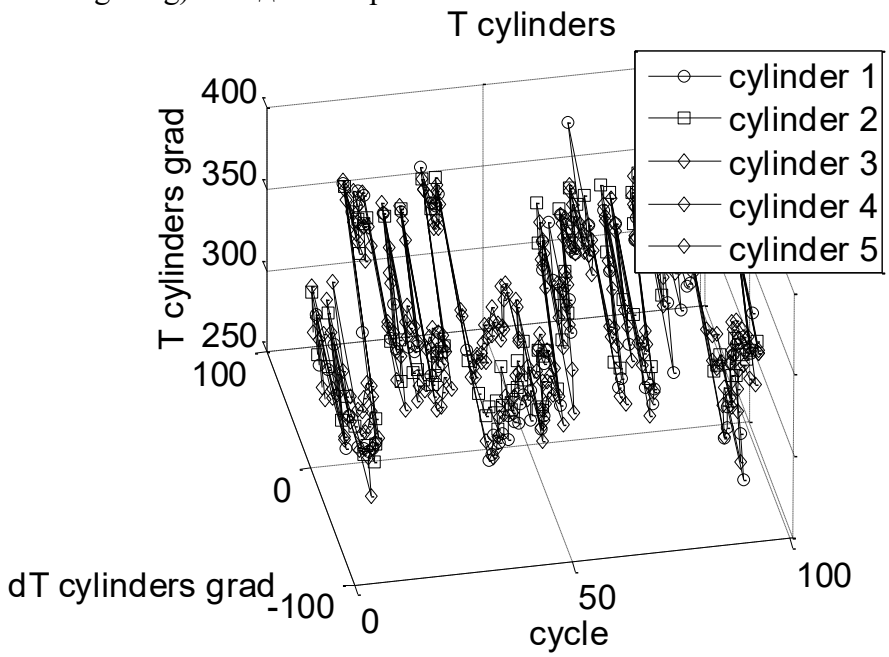


Рисунок 2 – Часовий ряд температур вихідних газів по циліндрам

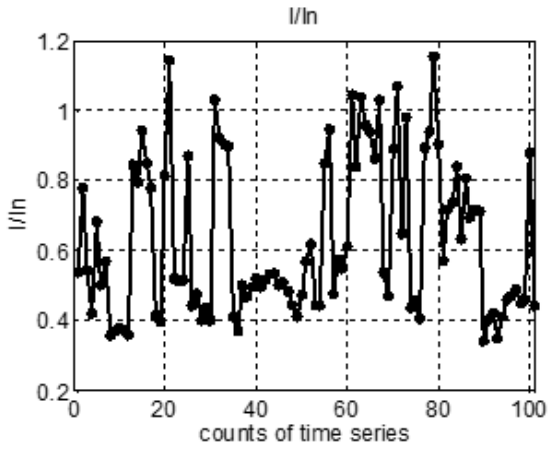


Рисунок. 3 – Часовий ряд сили струму

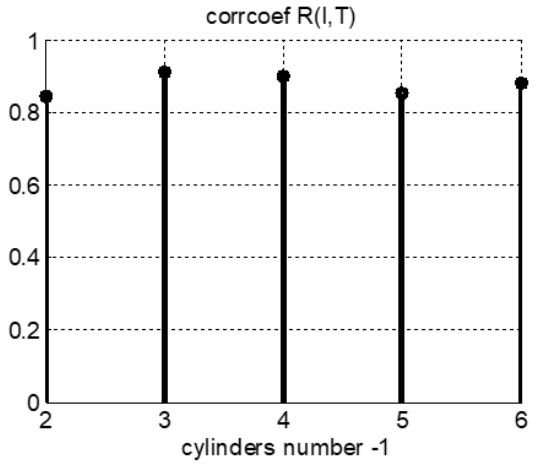


Рисунок. 4 – Коефіцієнти взаємокореляці\ температури газів та струму по циліндрам ДГУ

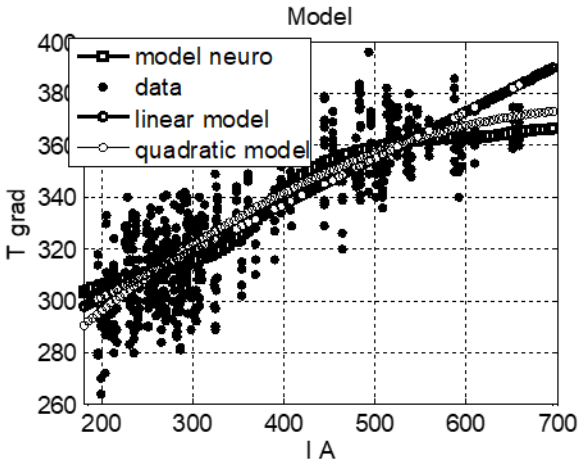


Рисунок. 5 – Регресійні моделі\ температури газів та струму ДГУ

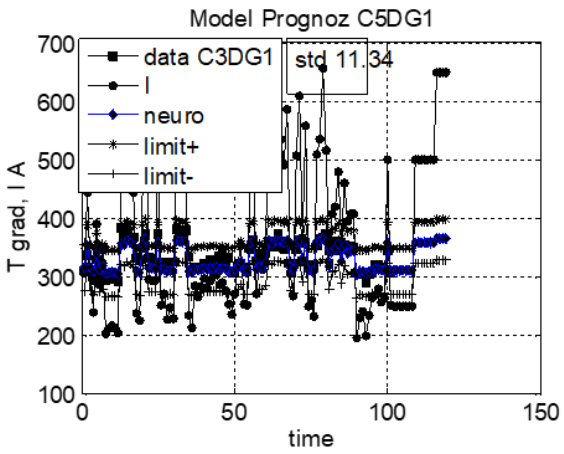


Рисунок.6 – Прогноз температури газів ДГУ за циліндром 5

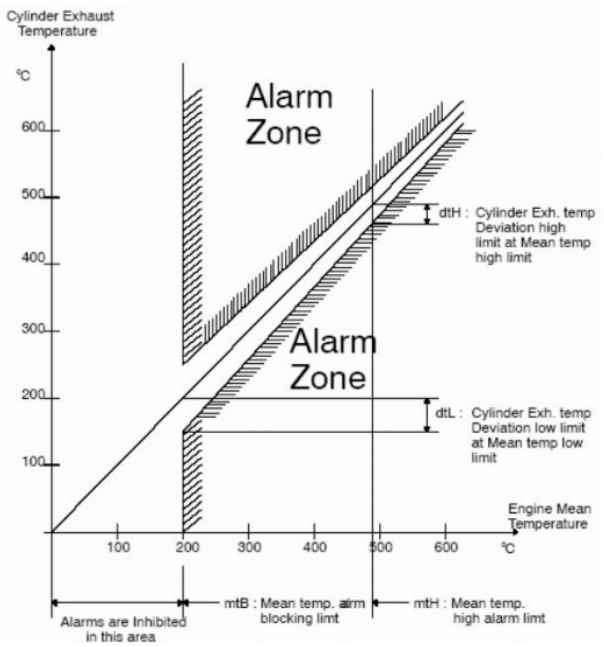


Рисунок. 7 – Допуск температури газів ДГУ за методикою Kongsberg

Таким чином, результати статистичної обробки вихідних даних та прогнозу зміни стану ДГУ за обраним параметром надають наступні дані щодо середньоквадратичної похибки (STD):Циліндр 1: 11,34 grad, Циліндр 2: 16,02 grad, , Циліндр 3: 16,07 grad, Циліндр 4: 16,68 grad, Циліндр 5: 16,96 grad. Середньоквадратичні значення похибки за відомими класичними регресійними моделями становлять більш ніж 20 grad, що, власне, свідчить про переваги нейромережевої моделі.

Висновки. Основними висновками є наступні:

Виконано статистичний аналіз та встановлені найбільш значимі зв'язки між параметрами реєстрації технічного стану ДГУ за значенням коефіцієнта взаємокореляції. Розроблені нелінійні регресійні моделі, як традиційні поліноміальні, так і нейромережеві, взаємозв'язку температури вихідних газів циліндрів дизельного двигуна від його навантаження та виконана її перевірка на адекватність. Встановлена та підтверджена можливість прогнозування технічного стану ДГУ за обраними параметрами на основі побудови нейромережі регресії. Встановлено, що. нейромережа регресії забезпечує вірогідне прогнозування зміни обраного параметра діагностування в різних режимах навантаження з похибкою, яка відповідає нормативним межам допуску температури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гвоздева, И.М. Идентификация математической модели температурного режима судовых дизель-генераторных установок на основе генетических алгоритмов [Текст] / И.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, С.В. Колесник, С.В. Корольчук // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 23.11.2021 - 24.11.2021. – Одеса: НУ «ОМА», 2021. – С.103-108. ISSN 2706-7874 (print). DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238

2. Миргород, В.Ф. Апроксимаційно – марківські моделі зміни параметрів технічного стану силових та енергетичних установок у довготривалій експлуатації / В.Ф. Миргород, І.М. Гвоздева, В.В. Будашко // Авіаційно-космічна техніка і технологія – № 4 ч.2 – 2022. – С.73-79, DOI: https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.11

http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/view/aktt.2022.4sup2.11

3. Multiparameter Approximation Model of Temperature Conditions of Marine Diesel Generator Sets, Based on Markov Chain Monte Carlo

Myrhorod, V., Hvozdeva, I., Budashko, V. TransNav, 2022, 16(4), pp. 779–784

DOI: 10.12716/1001.16.04.20

EID: 2-s2.0-85146804722

Part of ISSN: 20836481 20836473

4. . Миргород, В.Ф. Визначення трендової складової часового ряду засобами реального часу при технічній експлуатації складних енергетичних об'єктів / В.Ф. Миргород, І.М. Гвоздева // Авіаційно-космічна техніка і технологія – № 4. ч.1 – 2025. – С.176-182.

DOI: https doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.23

http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/view/aktt.2025.4sup1.23

Секція 2. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Борса Є. В. здобувач другого рівня вищої освіти
https://orcid.org/0009-0004-4880-8225
Будашко В.В., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Сучасні суднові енергетичні установки мають забезпечувати високу ефективність і надійність під час роботи в різноманітних умовах експлуатації. Застосування комбінованих пропульсивних комплексів на сучасних суднах дає змогу досягати кращої маневреності, економічності та раціонального використання потужності двигунів. У цій роботі розглядаються процеси передавання потужності в електроенергетичній системі судна з комбінованим пропульсивним комплексом, що функціонує в різних режимах. Основна мета роботи полягає у вивченні принципів роботи пропульсивного комплексу та аналізі енергетичних процесів за різних експлуатаційних умов. Метою роботи є дослідження енергетичних процесів у комбінованих пропульсивних комплексах суден. Для досягнення мети необхідно вирішити основні завдання: ознайомитися з теоретичними основами передавання потужності, визначити основні методи розрахунку потужності для конкретного судна, обладнаного комбінованим пропульсивним комплексом та оцінка ефективності енергетичних процесів у різних режимах роботи.*

Ключові слова: *судновий пропульсивний комплекс, прогнозне керування, підрулюючі пристрої, діагностика, коливання навантаження.*

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR COMPENSATING LOAD FLUCTUATIONS OF ELECTRIC PROPULSION COMPLEXESS

Borsa Y. V. second-level graduate of higher education
https://orcid.org/0009-0004-4880-8225
Budashko V. Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0003-4873-5236
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *Modern ship power plants must provide high efficiency and reliability during operation in various operating conditions. The use of combined propulsion complexes on modern ships allows for better maneuverability, economy and rational use of engine power. This work considers the power transmission processes in the electrical power system of a ship with a combined propulsion complex operating in different modes. The main objective of the work is to study the principles of operation of the propulsion complex and analyze energy processes under different operating conditions. The aim of the work is to study energy processes in combined propulsion complexes of ships. To achieve the goal, it is necessary to solve the main tasks: to familiarize yourself with the theoretical foundations of power transmission, to determine the main methods for calculating power for a specific ship equipped with a combined propulsion complex and to assess the efficiency of energy processes in different operating modes.*

Keywords*: ship propulsion complex, predictive control, thrusters, diagnostics, load fluctuations.*

Ціллю досліджень: проведення вимірювань коливань навантаження під час пуску та оперування електричною пропульсивною установкою із носовим підрулюючим пристроєм із фіксацією перехідних та усталених процесів у судновій електроенергетичній системі, оцінкою якості електроенергії та динаміки роботи.

Мета дослідження: поглиблено дослідити природу та параметри коливань напруги,

частоти, струмів і *cos* φ, спричинених роботою носового підрулюючого пристрою (НПП), та розробити й перевірити практичні методи їх компенсації в електроенергетичній системі судна.

Навчально-практичний контекст на борту mv "Jamno": підчас стажування проводилося ознайомлення зі складом і принципами роботи головної енергетичної установки (ГЕУ), інтегрованою системою моніторингу та керування (*K-Chief* 600), системою керування головним двигуном (*Auto-Chief* 600), а також допоміжними електротехнічними системами судна (генераторні установки, щити розподілу, захист, синхронізація, *PMS*) із вимірюванням параметрів ГЕУ в експлуатаційних режимах електричної пропульсивної установки із НПП.

Основні завдання для досягнення мети роботи:

– ознайомлення зі складом, режимами роботи та структурою ГЕУ та допоміжних систем; дослідження архітектури електроенергетичної системи судна на практиці (генератори, ГРЩ/РП, захисти, синхронізація, *PMS*);

– вивчення системи моніторингу й керування електричною пропульсивною установкою із НПП та інтегрованими інтерфейсами з електроенергетичною системою;

– формулювання програми вимірювань: визначення точки контролю (ГРЩ, секції шин, вводи, лінії живлення НПП), перелік параметрів (*U*, *f*, *I*, *P*, *Q*, *S*, *cos* φ);

– проведення серії експериментів із пуском/зупинкою та зміною тяги НПП в типових суднових режимах (швартові операції, маневрування), фіксація провалів напруги, коефіцієнту потужності та реакції регуляторів (*AVR*, регулятор палива/частоти) та *PMS*;

– обробка результатів: побудова часових діаграм, спектрів, статистичних кривих; визначення амплітуди коливань, тривалості відновлення параметрів, зміни *cos* φ і навантаження генераторів;

– удосконалення методів компенсації коливань навантаження підчас управляння електропропульсивним комплексом із НПП.

На основі відомих методик [1-10], використовуючи інформацію з відкритих джерел для однотипоного судна *Bourbon Oa–Bourbon Orca* [11-15]:

– діаметр гвинта $D = 3.6$ м;

– тяга на кнехті (на бочці) $BP = 183$ тс;

– максимальна швидкість $V_s = 17$ вузлів $= 8.745548\ ^{м}/_{с}$;

– кількість головних гвинтів $N_{гвинт} = 2$;

– $\rho = 1025\ ^{кг}/_{м^3}$ – середнє значення для солоности 35‰ і температури ≈15 °C (умови стандартної морської води за ISO 80000 та ITTC [15])

– $g = 9.80665\ ^{м}/_{с}$ – прийнятий стандарт (World Geodetic System, ISO 80000-3, CODATA) [19-22].

Переведення тяги НПП в Ньютони [16-18]:

$$T_{загальний} = 183\ тс \cdot 1000\ \frac{кг}{т} \cdot g = 1794616.95\ H$$

Тяга на один гвинт:

$$T_1 = \frac{T_{загальний}}{2} = \frac{1794616.95}{2} = 897308.475\ Н$$

Коефіцієнт тяги K_{T0} при $J = 0$:

$$T = \rho n^2 D^4 K_T \Rightarrow K_{T0} = \frac{T_1}{\rho n^2 D^4}$$

де $n = \frac{об}{с}, n = \frac{rpm}{60}$

$$K_{T0}(rpm) = \frac{T_1}{\rho\left(\frac{rpm}{60}\right)^2 D^4} = \frac{T_1 \cdot 60^2}{\rho D^4} \cdot \frac{1}{rpm}$$

Обчислення константи:

$$\frac{T_1 \cdot 60^2}{\rho D^4} = \frac{897308.475 \cdot 3600}{1025 \cdot 167.9616} = 18763.350961$$

Отже:

$$\boxed{K_{T0}(rpm) = \frac{18763.350961}{rpm}}$$

Обчислемо для різних *rpm*:

$$K_{T0}(150) = \frac{18763.350961}{150} = 0.83393$$
$$K_{T0}(160) = \frac{18763.350961}{160} = 0.73294$$
$$K_{T0}(170) = \frac{18763.350961}{170} = 0.64925$$
$$K_{T0}(180) = \frac{18763.350961}{180} = 0.57912$$
$$K_{T0}(190) = \frac{18763.350961}{190} = 0.51976$$

Виконуючи розрахунки за відомими методиками [23-31], отримуємо результати, які представлені на рис. 1, 2, 3 та 4, відповідно: залежність коефіцієнту тяги до швидкости обертання гвинта НПП, залежність тяги від швидкості руху судна, залежність струму від частоти обертів гребних гвинтів, залежність тяги від обертів гвинта.

Підчас проведення експерементальних досліджень на борту судна *mv* «*Jamno*» зафіксовано, що під час маневрів, насамперед швартувань у портах, активно використовується носовий підрулюючий пристрій (НПП). Типовий часовий профіль такий: сумарний інтервал роботи НПП підчас маневрів сягає **до 2 годин**, з яких **приблизно від 5-10 хв. до 30 хв.** припадає власне на **оперування** (створення тяги, реверси, утримання курсу біля причалу). Решту часу підрулюючий пристрій перебуває у **режимі чергування**: електродвигун обертається без навантаження (лопаті *CPP* у нейтралі), гідросистема підтримує готовність.

У фазі активного оперування фіксується повторюваний цикл короткочасних імпульсів тяги з частими змінами напряму (*port*/*starboard*) та амплітуди кроку.

Типовий сценарій: серії команд з тривалістю 1-2 хв. та паузами такого самого інтервалу.

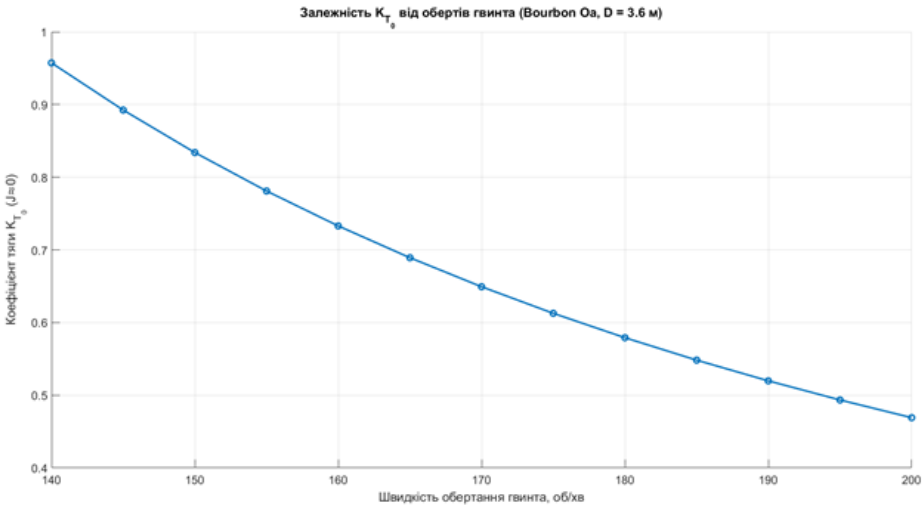


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту тяги до швидкости обертання гвинта

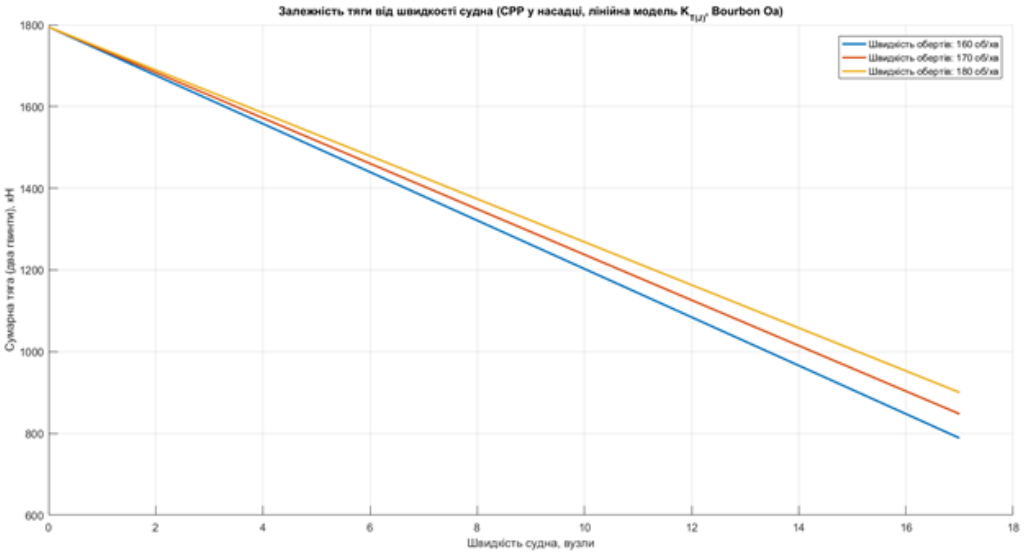


Рисунок 2 – Залежність тяги від швидкості руху судна

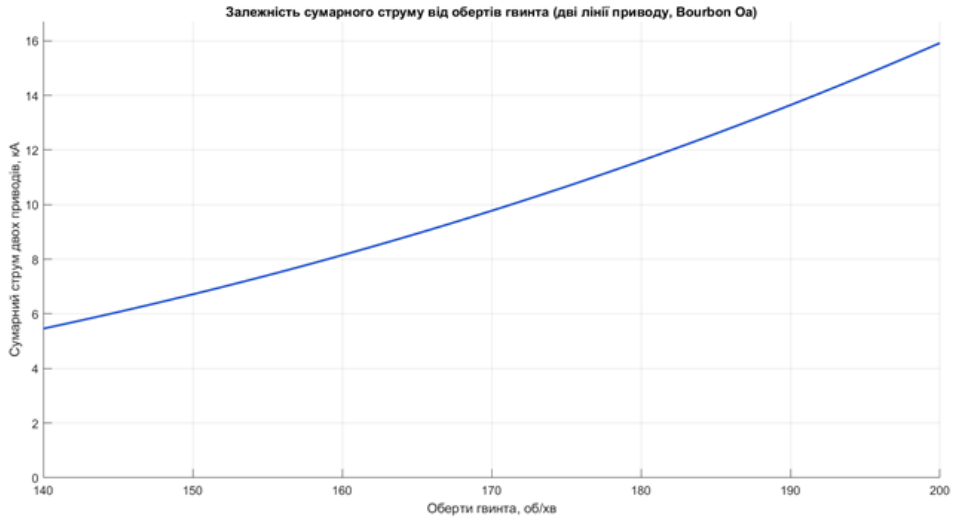


Рисунок 3 – Залежність струму від частоти обертів гребних гвинтів

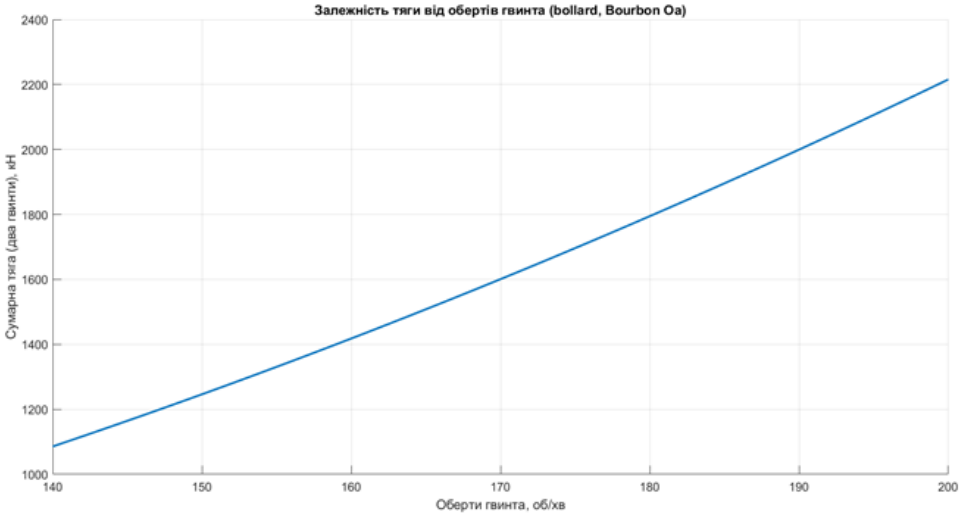


Рисунок 4 – Залежність тяги від обертів гвинта

Керування здійснюється з містка або крил містка джойстиком із пропорційним заданням кроку (*pitch*). Оперування підрулюючим пристроєм забороняється при швидкості вищої за 5 вузлів. На практиці НПП знаходився в режимі чергування, але не оперувався, навіть при швидкості у 7 вузлів, таке траплялося під час виходу із порту.

На рис. 5-9 показані результати моніторингу енергетичних процесів підчас управління НПП на часткових режимах роботи пропульсивного комплексу.

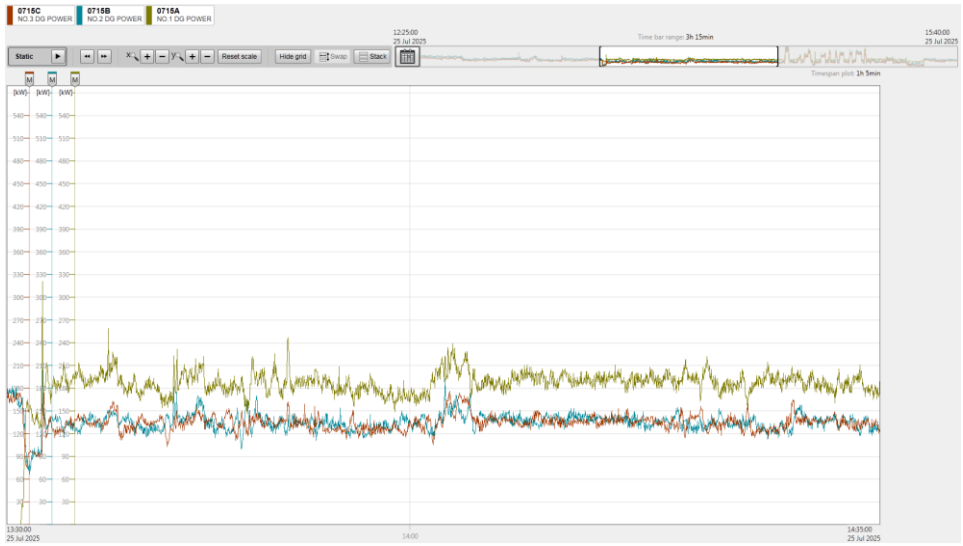


Рисунок 5 – Потужність генераторів у режимі чергування

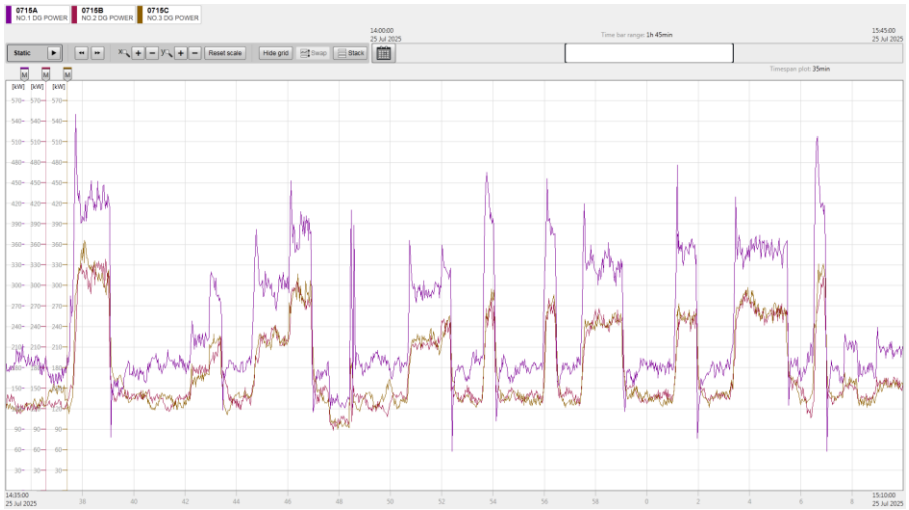


Рисунок 6 – Потужність генераторів під час оперування

У дослідженні слід також враховувати людський фактор для обґрунтування переваг та недоліків встановлення суперконденсаторів та НПП взагалі.

Так, наприклад під час маневрів 25 липня 2025 року, лоцман «не побачив струменя води від носового підрулювального пристрою», через що дав запит у машинне відділення на зупинку та повторний запуск НПП, що можна побачити на графіках струму рис. 7.

Емпірично відзначено, що у режимі чергування **загальний коефіцієнт потужності** суднової електроенергетичної системи (*cos* φ) помітно **падає до ~0,5**, і таке навантаження може тривати до двох годин (сукупно за період маневрування). Підчас **активного оперування** підрулюючим пристроєм *cos* φ **зростає до ~0,8**, після чого знову повертається до чергувальних значень (~0.5).

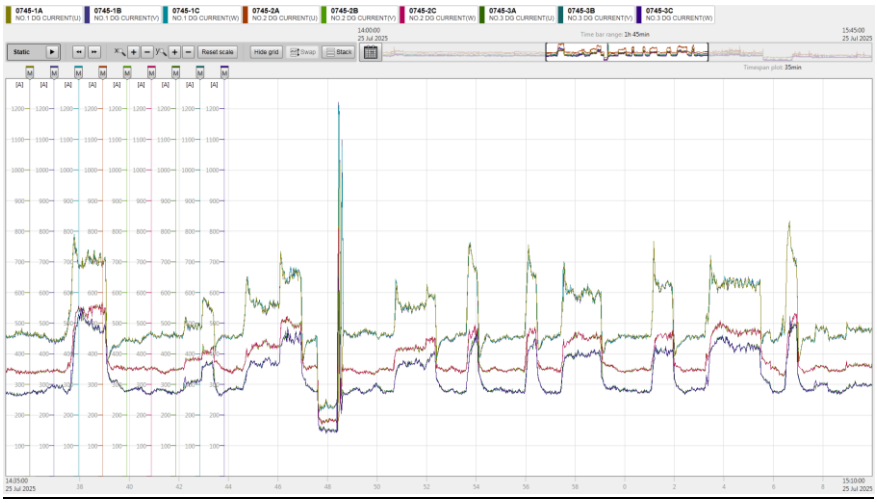


Рисунок 7 – Струми генераторів під час оперування НПП

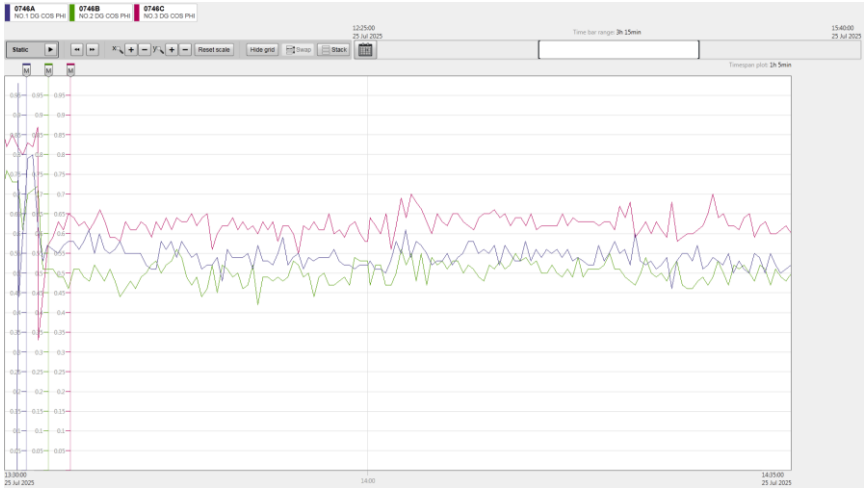


Рисунок 8 – Коефіцієнт потужності у режимі чергування

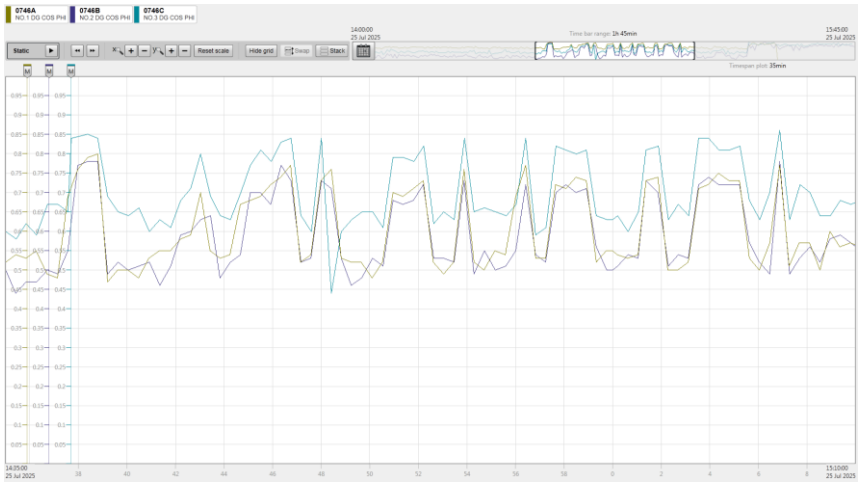


Рисунок 9 – Коефіцієнт потужності під час оперування

Фізично це пояснюється тим, що асинхронний двигун підрулюючого пристрою на холостому ходу **майже не має навантаження**, тобто активна потужність ***P*** мала, а **реактивна складова *Q*** порівняно велика. Це знижує *cos* φ на шинах ГРЩ, погіршує резерв за струмом генераторів і може збільшувати втрати та падіння напруги при приєднанні інших споживачів.

На практиці суперконденсаторні системи або активні компенсатори часто встановлюють на суднах із двома і більше підрулюючими пристроями, де реактивна компонента в режимі чергування істотніша. Для судна з одним підрулюючим пристроєм (як на *mv* «*Jamno*») економічний ефект від його наявності та потреба у встановленні суперконденсаторів неочевидна, так на доданок все одно залучаються буксири.

Водночас експлуатація на внутрішніх водоймах/Великих Озерах (для яких судно збудоване) може змінити баланс на користь підрулюючого пристрою: часті маневри у Великих Озерах, через що зростає необхідність у підвищеній вимоги до автономності, роблять комплекс підрулюючого пристрою більш виправданим через вищу оперативність.

Висновок

Дослідження енергетичних процесів на *mv* «*Jamno*» надало цілісний практичний досвід роботи з головними та допоміжними технічними системами судна та стало основою для проведення цільових спостережень і вимірювань впливу електричного НПП на роботу електроенергетичної системи. У процесі системно фіксувалися параметри пропульсивного комплексу з *CPP*, робота систем дистанційного керування, дизель-генераторних установок, а також контурів автоматизації та моніторингу.

Вимірювання характеристик головної енергетичної установки виконувалися багаторазово підчас реальних швартових і маневрових епізодів. Дані збиралися зі штатних засобів моніторингу (*K-Chief* 600) з контролем трендів U, I, P, Q, S, $\cos\varphi$, f та фіксацією подій. Для кожного епізоду реєструвалися часові мітки, характер навантаження (режим чергування/оперування), тривалість ділянок, «ступені» й провали напруги ΔU та час її відновлення, реакції *AVR* і паливних регуляторів дизель-генераторів, а також розподіл активної й реактивної потужності між працюючими *DG* та навантаженням НПП. Окремо відзначалися режими холостого ходу електродвигуна НПП (лопаті *CPP* у нейтралі).

Ключові результати:

– проведено повторювані спостереження впливу НПП на ЕЕС; зафіксовано типові профілі $\cos\varphi$ у *standby* (~0,5) через значне споживання реактивної потужності електроприводом без механічного навантаження та у фазі активної роботи (~0,8) під час створення тяги й реверсів у межах маневрів тривалістю до 2 годин;

– виявлено характерну зміну розподілу P/Q під час переходів чергування ↔ оперування: у чергуванні домінує реактивна складова НПП, а при роботі під навантаженням зростає активна складова та $\cos\varphi$ наближається до нормативних значень; реакції AVR і регуляторів палива забезпечують стабілізацію U та f без тривалих відхилень;

– оцінено перехідні процеси на головному розподільчому щиті (ГРЩ) при різких змінах кута лопатей *CPP*: зафіксовані короткочасні провали напруги в межах допустимих експлуатаційних значень із поверненням до номіналу за типовий час; випадків розсинхронізації *DG* не зафіксовано;

– удосконалено **метод компенсації коливань навантаження шляхом використання архівів** *K-Chief* 600 (тренди U, I, P, Q, S, $\cos\varphi$, f, а також журнали тривог і подій) для подальшої кількісної оцінки впливу НПП на ЕЕС, створення порівнюваних «паспортів» маневрів і визначення повторюваних стрибків навантаження.

Висновки та перспективи.

Отримані результати підтверджують суттєвий вплив режиму *standby* НПП на $\cos\varphi$ і реактивну складову системи, а також прогнозоване вирівнювання параметрів при переході до робочого режиму. Сформована база даних і відпрацьована методика аналізу трендів стануть підґрунтям для подальших досліджень у рамках теми **удосконалення методу компенсації коливань навантаження електричних пропульсивних комплексів**, з фокусом на:

– алгоритмах корекції та узгодження роботи *AVR* і паливних регуляторів *DG* у

перехідних режимах;

– оптимізації залучення джерел реактивної потужності (*PFC*, ВАР-підтримка);

– рекомендаціях щодо режимів роботи НПП та послідовності операцій із *CPP* для зменшення амплітуди коливань навантаження на ЕЕС і підвищення загальної стійкості системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:10.15587/1729-4061.2017.101298.

2. Fossen, T. (2021) Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd edn. Wiley. Available at: https://www.perlego.com/book/2761053/handbook-of-marine-craft-hydrodynamics-and-motion-control-pdf (Accessed: 12 January 2024).

3. Goor, van P. Constructive Equivariant Observer Design for Inertial Navigation / P. van Goor, T. Hamel, R. Mahony // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – V. 56. – I. 2. – P. 2494-2499. ISSN 2405-8963. Doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1229.

4. Maidana, R. G. Risk-based path planning for preventing collisions and groundings of maritime autonomous surface ships [Text] / R. G. Maidana, S. D. Kristensen, I. B. Utne, A. J. Sørensen // Ocean Engineering. – 2023. – V. 290. – 116417. ISSN 0029-8018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116417.

5. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to *DP* Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference: Workboats. – 2002 (September 17 – 18). – 22 p. Режим доступу: \www/ URL: http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats_packaged_system.pdf. – 13.05.2024 г. – Загол. з екрану.

6. Cozijn, H. Analysis of the velocities in the wake of an azimuthing thruster, using PIV measurements and CFD calculations [Text] / H. Cozijn, R. Hallmann, A. Koop // Dynamic positioning conference: thrusters session. – October 12–13, 2010. – Houston: Maritime Research Institute Netherlands (MARIN). – 25 p. Режим доступу: \www/ URL: http://www.refresco.org/wp-content/uploads/2015/05/2010-MTS-DP-Cozijn-Hallmann-Koop.pdf. – 24.08.2024 р. – Загол. з екрану.

7. Furmanik, M. Low-Speed Sensorless Control for Six-Phase PMSM Based on Magnetic Anisotropy / M. Furmanik, D. Konvičný, P. Rafajdus // Transportation Research Procedia. – 2023. – V. 74. – P. 892-899. ISSN 2352-1465. Doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.222.

8. Hemalatha, N. Sensorless speed and position control of permanent magnet BLDC motor using particle swarm optimization and ANFIS [Text] / N. Hemalatha, S. Venkatesan, R. Kannan, S. Kannan, A. Bhuvanesh, A.S. Kamaraja // Measurement: Sensors. – 2024. – V. 31. – 100960. ISSN 2665-9174. Doi: 10.1016/j.measen.2023.100960.

9. Sun, L. Low speed sensorless control method of brushless DC motor based on pulse high frequency voltage injection [Text] / L. Sun // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61, I. 8. – P. 6457-6463. ISSN 1110-0168. Doi: 10.1016/j.aej.2021.12.005.

10. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121)), 49–71. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934.

11.Bourbon Offshore. *Bourbon Orca 181 MT / BP / DP2* [Електронний ресурс]. — 2 с. — URL: https://www.bourbonoffshore.com/sites/default/files/documents-associes/pdf/bourbon-orca-181-mt-bp-dp2.pdf.

12.Cummins. *KTA19 – Marine Propulsion & Auxiliary Engines. Marine Spec Sheet* [Електронний ресурс]. — 2 с. — URL: https://www.dieselrebuildkits.com/wp-content/uploads/2018/03/kt19-marine-specsheet2.pdf

13.VEM Sachsenwerk GmbH. *Electrical Motors and Machines for Shipbuilding Industry* [Електронний ресурс]. — Dresden: VEM Group, 2017. — 40 с. — Режим доступу: https://maharfanabzar.com/wp-content/uploads/2023/06/Electrical-Motors-and-Machines-for-Shipbuilding-Industry.pdf.

14.International Towing Tank Conference (ITTC). *Fresh-Water and Seawater Properties (ITTC-78/— / 7.5-02-01-03)* [Електронний ресурс]. — URL: https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf.

15.Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). *3rd CGPM (1901), Resolution 2: Acceleration of free fall* [Електронний ресурс]. — URL: https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/3-1901/resolution-2

16. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:10.15587/1729-4061.2017.101298.

17. Glad, T., & Ljung, L. (2000). Control Theory (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315274737.

18. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179301.

19.Wärtsilä. *Wärtsilä 32 Product Guide* [Електронний ресурс]. — URL: https://brandhub.wartsila.com/m/54000f75ef455f3d/original/Wartsila-32-Product-guide.pdf

20.Wärtsilä. *Wärtsilä 20 Product Guide* [Електронний ресурс]. — 2015. — 178 с. — URL: https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2015%20W%C3%A4rtsil%C3%A4-20_product_guide.pdf

21.Riviera Maritime Media. *Diesel-electric power for novel AHTS vessel* [Електронний ресурс] // *Riviera Maritime Media*. — 02 грудня 2008. — Режим доступу: https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/diesel-electric-power-for-novel-ahts-vessel-51072.

22.Riviera Maritime Media. *Iconic design lives up to expectations* [Електронний ресурс] // *Riviera Maritime Media*. — 19 березня 2006. — Режим доступу: https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/iconic-design-lives-up-to-expectations-50474

23. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi; Department of Ocean Engineering, AmirKabir University of Technology // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – 11 p. Doi:10.6119/JMST-013-0117-2.

24. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.252172.

25. Carrera, A. Cognitive system for autonomous underwater intervention [Text] / A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtós, P. Kormushev, M. Carreras // Pattern Recognition Letters. – 2015. – V. 67(1). – P. 91–99. Doi:10.1016/j.patrec.2015.06.010.

26. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: 10.12716/1001.16.01.11.

27. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121), 49–71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934.

28. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.225517.

29. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

30. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: 10.15587/1729-4061.2022.266267.

31. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773.

НАДІЙНІСТЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У СИСТЕМІ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ ТА ВИМОГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Найденко О. В., д.т.н., професорка
https://orcid.org/0000-0001-5684-5617
Берсеньова Н. М., курсантка
https://orcid.org/0009-0007-9333-6513
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація: *У статті розглянуто підходи до забезпечення надійності асинхронних двигунів у контексті європейських стандартів енергоефективності. Подано основні показники надійності, чинники відмов, огляд нормативних документів та тенденції підвищення довговічності електричних машин. Наведено аналітичні графіки, що демонструють вплив класу енергоефективності на теплові втрати, ресурс і кількість відмов.*

Keywords*: асинхронний двигун; FMEA; аналіз ризиків; надійність електроприводів; режими відмов; RPN; енергоефективність; IEC 61800-5-1; IEC 60204-1; аналіз безпеки; технічне обслуговування; функціональна безпека; електромеханічні системи.*

RELIABILITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITHIN THE FRAMEWORK OF EUROPEAN STANDARDS AND ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS

Naidenko O. V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0001-5684-5617
Bersenova N. M., Master Student
https://orcid.org/0009-0007-9333-6513
Odesa Polytechnic National University

Abstract: *The article examines approaches to ensuring the reliability of induction motors in the context of European energy efficiency standards. It presents the main reliability indicators, failure factors, an overview of regulatory documents, and trends in improving the longevity of electrical machines. Analytical graphs are provided, demonstrating the impact of energy efficiency class on thermal losses, lifespan, and failure rates.*

Keywords: *induction motor; FMEA; risk analysis; drive reliability; failure modes; RPN; energy efficiency; IEC 61800-5-1; IEC 60204-1; safety analysis; maintenance; functional safety; electromechanical systems.*

Підвищення надійності асинхронних двигунів важливе для безперервності виробництва, енергетичної безпеки та дотримання екологічних стандартів. Електродвигуни споживають близько 45 % світової електроенергії, тому навіть невелике підвищення ефективності має значний економічний та екологічний ефект. Регламент (ЄС) 2019/1781 для двигунів класів IE3–IE4 стимулює оптимізацію конструкцій і аналіз факторів надійності та довговічності.

Надійність визначається як здатність виконувати функції без відмови [3] і оцінюється за показниками: безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність і збережуваність. Основні причини відмов АД — пошкодження ізоляції, знос підшипників, порушення балансування ротора та перегрів від перевантаження або нестабільного живлення; понад 55 % відмов пов’язані з перегрівом та деградацією ізоляції [4].

Ця діаграма — кругова (pie chart), яка показує розподіл основних складових надійності асинхронного двигуна.

Діаграма ілюструє відносну вагу кожного показника у комплексній оцінці надійності.

Безвідмовність (35 %), довговічність (30 %), ремонтопридатність (20 %) і збережуваність (15 %) визначають комплексну надійність двигунів. Європейські стандарти елек-

тричних машин базуються на IEC 60034 (EN 60034 у ЄС) і регламентують випробування, втрати, шум, вібрацію та температуру. EN 60034-30-1:2014 визначає класи енергоефективності IE1–IE5.

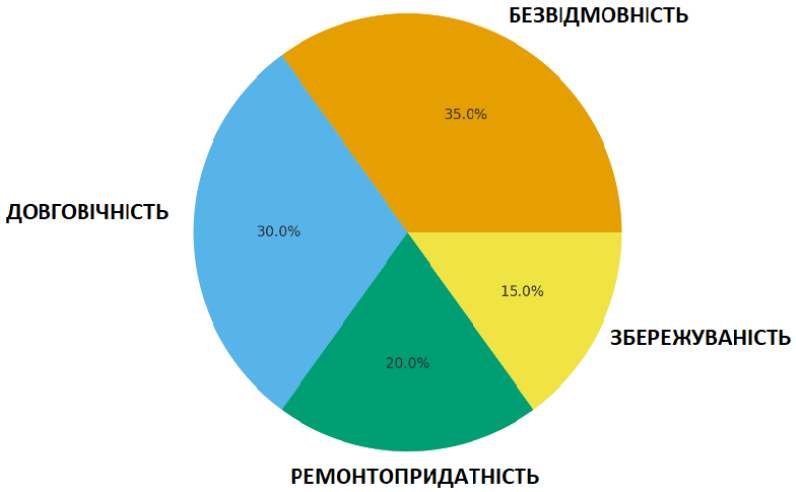


Рисунок 1 – Основні складові надійності АД

З 1 липня 2021 року відповідно до Регламенту (EU) 2019/1781 у ЄС дозволено використовувати лише двигуни класу IE3 і вище, включно з частотними перетворювачами для підвищення енергоефективності. Зниження електричних і механічних втрат у високоефективних двигунах зменшує температуру обмоток і підшипників, подовжуючи термін служби ізоляції: за оцінками ABB, кожне зниження на 10 °C подвоює термін служби ізоляційних матеріалів. Двигуни IE3–IE5 економлять енергію та підвищують стабільність і довговічність, зменшуючи відмови та витрати на обслуговування. Однак самі стандарти не гарантують безвідмовної роботи — для цього потрібна системна оцінка ризиків експлуатації, наприклад, за методикою FMEA.

1. **Визначення понять.**

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) — метод системного аналізу ризиків для виявлення потенційних відмов, їх причин, наслідків і пріоритетів зниження ризиків. Використовується в електроприводах, машинобудуванні та енергетиці, особливо для асинхронних двигунів (АД), що працюють у складних умовах і відповідають стандартам IEC 61800-5-1, IEC 60204-1, IEC 60034 [8]. Альтернативи: FTA, HAZOP, RCM, RCA, FMECA та марковські/стохастичні моделі [8]. Переваги FMEA — простота, структурованість, раннє виявлення слабких місць, кількісний показник RPN [8]; недоліки — залежність від експертних оцінок, неврахування складних взаємозв'язків, значні часові витрати [9]. Актуальність зростає через вимоги IEC, поширення ПЧ і «розумних» датчиків та перехід до Predictive Maintenance [1,9].

2.Підготовка та побудова сигнально-поведінкової схеми АД.

Перший етап FMEA — функціональний аналіз системи з урахуванням стандартів IEC 61800-5-1 і IEC 60204-1 [12] та побудова сигнально-поведінкової моделі, що включає логіку роботи, взаємодію елементів і потенційні небезпечні стани.

Далі визначаються можливі режими відмов, їхні причини та наслідки для елементів двигуна: статор, ротор, підшипники, ізоляція, система охолодження, ПЧ і захисти. Наприклад, перегрів обмотки або пробій ізоляції для статора, знос або висихання мастила для підшипників.

Кожному режиму присвоюють параметри Severity (S), Occurrence (O) та Detection (D) за десятибальною шкалою. На основі цих значень обчислюється RPN = S·O·D, що дозволяє визначити критичні відмови та пріоритети для підвищення надійності й планування технічного обслуговування.

Таблиця 1 - FMEA-таблиця

Елемент	Failure Mode	Cause	Effect	S	O	D	RPN = S·O·D	Дії (Actions)
Статор	Перегрів	Недостатнє охолодження	Пожежа, простій лінії	9	4	6	216	Температурні датчики, сигналізація.

3. Методика FMEA для АД

3.1. Підготовка та побудова сигнально-поведінкової схеми АД. Визначають нормативні обмеження за IEC 61800-5-1 та IEC 60204-1 і виконують функціонально-сигнальний аналіз, що включає сигнально-поведінкову та структурну схеми, взаємодію з ПЧ, реле, датчиками та логіку станів (пуск–робота–аварія–зупинка).

3.2. Ідентифікація Failure Modes, Causes, Effects. Для елементів двигуна (статор, ротор, підшипники, клемна коробка, вентилятор, ізоляція, ПЧ) визначають можливі відмови, їх причини та наслідки.

3.3. Визначення шкал S, O, D. Severity (S) — серйозність наслідків, Occurrence (O) — ймовірність відмови, Detection (D) — можливість раннього виявлення (1 — легко, 10 — практично неможливо).

3.4. Заповнення таблиці FMEA. Для кожного виду відмови заповнюють рядок таблиці, обчислюють RPN = S·O·D і визначають пріоритети для усунення критичних ризиків.

3.5. Заходи для зниження ризику. Для високоризикових RPN застосовують технічні (покращене охолодження, датчики, модернізація ізоляції, балансування, підбір підшипників) та організаційні дії (ТО, очищення, обмеження перевантажень, навчання операторів). Сучасні рішення включають маловтратні магнітопроводи, термостійкі лаки та Smart Motors для Predictive Maintenance [6]. Використання IE3 дозволяє скоротити споживання електроенергії на 10–15 % і знизити викиди CO_2 на понад 40 млн тонн на рік, підтримуючи «Європейський зелений курс» [7].

Висновки. Надійність асинхронних двигунів важлива для безпечної та ефективної роботи електроприводів. Стандарти IEC і регламент ЄС 2019/1781 стимулюють застосування двигунів IE3–IE5. FMEA дозволяє виявляти критичні відмови (перегрів, деградація ізоляції, знос підшипників), а високоефективні двигуни з системами моніторингу покращують тепловий режим і подовжують термін служби. Поєднання стандартів, методик і сучасних технологій підвищує надійність і довговічність АД.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023 Report [Text] / International Energy Agency. – Paris: IEA, 2023. – 112 p.

2. Krause G. Electric Machines and Drives: Design and Reliability [Text] / G. Krause. – Berlin: Springer, 2021. – 328 p.

3. ДСТУ IEC 60050-191:2004. Електротехнічна термінологія. Надійність і якість роботи [Text]. – 2004. – 56 с.

4. Siemens AG. Reliability of Induction Motors: Failure Statistics and Prevention [Text]. – Technical Report, 2020. – 24 p.

5. ABB Group. Motor Efficiency and Thermal Reliability Analysis [Text]. – Technical White Paper, 2022. – 32 p.

6. WEG Electric Corp. Smart Motor Systems: Predictive Maintenance and Energy Optimization [Text]. – 2023. – 28 p.

7. European Commission. Energy Efficiency in Motor Systems (EU-MOTIVE Project) [Text]. – Brussels, 2022. – 44 p.

8. E-University. Reliability assessment of variable speed induction motor drive with fault tree analysis [Text]. – 2023. – 36 p.

9. MDPI. Reliability assessment of induction motors in railway transport systems [Text]. – 2023. – 22 p.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ АГРЕГАТІВ СЕУ В ПРОЦЕСАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Михайленко В.С., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-1401-0053
Лещенко В.В., ст. викладач
https://orcid.org/0000-0003-0219-5174
Грама Г.П., к.п.н., доцент
https://orcid.org/0009-0001-6032-9196
Національний університет «Одеська морська академія»

***Анотація**: Проведено аналіз ефективності різних методів налаштування систем автоматичного управління суднових енергетичних установок, визначені їхні переваги та недоліки. Аналіз показників якості перехідних процесів в САУ показав, що найкращі значення показників якості (час регулювання і перше відхилення) - у експертного методу налаштування регуляторів.*

***Ключові слова:** Ефективність. Методи налаштування регуляторів, показники якості перехідних процесів (час регулювання і перше відхилення).*

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF METHODS FOR ADAPTATION OF SPP UNITS IN VARIABLE LOAD PROCESSES

Mykhailenko V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-1401-0053
Leshchenko V., Senior Teacher
https://orcid.org/0000-0003-0219-5174
Grama H., Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0009-0001-6032-9196
National University «Odessa Maritime Academy»

***Abstract:** The analysis of the effectiveness of various methods for tuning automatic control systems of ship power plants was carried out, their advantages and disadvantages were determined. Analysis of the quality indicators of transient processes in the ACS showed that the best values of quality indicators (regulation time and first deviation) are in the expert method of tuning regulators.*

***Keywords:** Efficiency. Regulator tuning methods, transient quality indicators (regulation time and first deviation).*

В процесі експлуатації агрегатів суднових енергетичних установок (СЕУ), періодично, один раз в три роки, виникає необхідність проводити їхнє теплотехнічне налаштування та допоміжного обладнання. З метою підвищення ефективності процесу налаштування систем автоматичного управління (САУ), поліпшення рівня адаптації суднових агрегатів до умов експлуатації, а також зниження впливу аварійних ситуацій, пов'язаних з помилками операторів і наладчиків пропонується провести аналіз методів адаптивного управління.

Для порівняльного аналізу найбільш поширених в САУ агрегатів СЕУ на прикладі суднових парових котлів (СПК), методів адаптивного управління [1-5], з метою визначення їх ефективності за критеріями оптимізації прямих показників якості процесів експлуатації СПК, проведено імітаційне моделювання. Як об'єкт управління обрана підсистема стабілізації тиску пару.

Відомо, що класичні ПІД-регулятори, параметри налаштування яких розраховані за методом Зиглера-Нікольса, не завжди забезпечують необхідну якість процесу регулювання [4]. Як правило, потрібна додаткове підстроювання їх параметрів. Незважаючи на це, метод Зиглера-Нікольса і деякі його модифікації поширені в адаптивних САУ і виробники суднових систем управління рекомендують їх для оптимального налаштування та подальшої адаптації, в ході експлуатації, параметрів агрегатів СЕУ. Також, для порівняль-

ного аналізу методів налагодження та адаптації САУ, на прикладі об'єкта СПК, проведено дослідження поширеної методики розрахунку оптимальних налаштувань параметрів ПІ-регулятора в парових САУ по методу Коєна-Куна і методу налаштування AMIGO [2,3].

При розробці САУ парогенеруючих агрегатів вітчизняного виробництва часто використовуються методи розрахунку параметрів ПІД-регуляторів, запропоновані О.П. Капєлович [5] і емпіричні формули, запропоновані Теплотехнічним інститутом (ВТІ). Дані методи використовуються розробниками суднових САУ і в даний час.

Експертні правила налагодження САУ [3] застосовуються також для регуляторів, що використовують методи експертних систем і нечіткої логіки. Представлений експертний метод у вигляді правил, які використовують досвід і знання експерта-наладчика, за впливом параметрів регулятора на характеристики процесу регулювання виду «ЯКЩО Умова 1 (час регулювання велике) І «Умова 2 (коливання перехідного процесу велике» ТО «Дія – зменшити K_p і збільшити T_i» і т.д. рекомендується використовувати при налаштуванні ПІД-регуляторів агрегатів СЕУ ряду зарубіжних компанії. Порівняльна апробація перехідних процесів САУ тиску пару, представлених вище методів і методик виконана за допомогою комп'ютерного моделювання ПІ-регулятора з моделлю СПК (рис.1), проводилася в програмі MatLab.

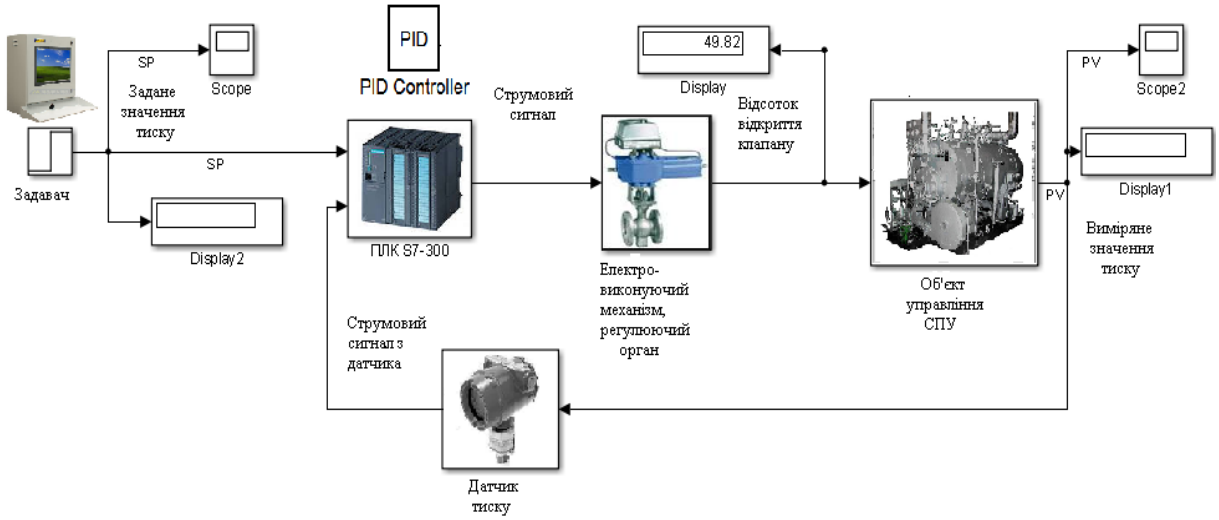


Рисунок 1 – Схема змодельованої САУ тиску пару СПК

Порівняльний аналіз критеріїв якості САУ досліджуваних методів на прикладі САУ тиску пару СПУ представлений в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз показників методів адаптації ДПК КАВ 16 до умов експлуатації які реалізовані в САУ агрегатів СЕУ

Значення при використанні методів адаптації і оптимізації САУ тиску пару СПУ				
Показники якості	Циглера-Ніколса	Оцінки моделі налаштування в процесі адаптації	Автоколивальний В. Ротача	Експертний
$T_р$, с (час регулювання),с	480	330	600	220
G, (%) –перерегулювання	40	25	35	-
$T_{\text{розрахунку}}$, с – час знаходження оптимальних налаштувань в програмі	100	60	78	30
Час налаштування САУ (ручного корегування параметрів ПІ-регулятора), хв	5	7	6	1

Продовження таблицы 1				
Значення при використанні методів настройки і адаптації САУ тиску пару СПУ				
Показники якості	Коєна-Куна (5)	AMIGO (6)	А.Копєловича (7)	ВТІ (8)
$T_р$, с (час регулювання),с	430	400	700	600
G, (%)–перерегулювання	35	-	-	25
$T_{розрахунку}$, с – час розрахунку оптимальних налаштувань по формулам	60	60	60	60
Загальний час до оптимального налаштування САУ, хв	9	8	13	11

Висновки. На основі виду перехідних процесів і значень показників якості (першого відхилення, часу регулювання) (див. рис. 2), можна зробити висновок, що метод настройки AMIGO володіє більш високим показником швидкодії і малим часом регулювання в порівнянні з іншими методами настройками. Даний метод можна використовувати для налаштування процесів високо-інерційних об'єктів з запізненням, проте відрізняється тривалістю часу розрахунку і підбору оптимальних параметрів, які потребують в ряді випадків, ручного коректування. Метод вимірювання О.П. Копеловича має вельми низьку швидкодію і не має перерегулювання. Його можна використовувати для тих типів процесів, до яких не пред'являють жорстких вимог по швидкодії. Метод вимірювання Зиглера-Нікольса не враховує вимоги до запасу стійкості системи та демонструє неприпустимий закид, який може привести до виникнення аварійної ситуації на СПУ.

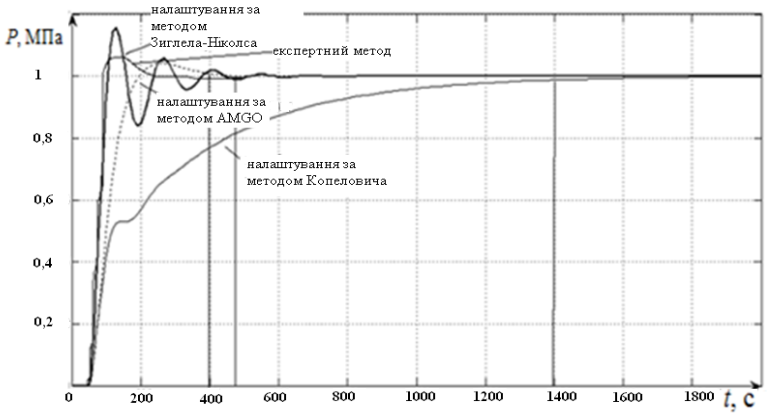


Рисунок 2 – Процеси САУ тиску пару ДПК КАВ 16/12 при номінальному навантаженні які демонструють ефективність методів розрахунку адаптивних параметрів ПІ-регулятора

Метод можна використовувати тільки для генерації початкових наближень параметрів, які потім уточняються методами оптимізації тільки в умовах відсутності впливу глибоких збурень на об'єкт регулювання. Аналіз показників якості перехідних процесів показав, найкращі значення показників якості САУ (час регулювання і перше відхилення) у експертного методу настройки регулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковріго Ю.М., Адаптивне управління теплоенергетичними процесами/Ю.М. Ковріго, Б.В. Фоменко, І.А. Поліщук // ААЕКС. - 2007. - № (2) 20. - С. 147 - 156.

2. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. Аналіз адаптивних методів налаштування нечітких та ПІ–регуляторів у складних об'єктах управління // Вісник НТУ «ХПІ». - 2012. - № 37. - С. 78 - 89.\

3. Mykhailenko V.S. Analysis of methods for adaptation of industrial control systems of thermal processes / V. S. Mykhailenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 4. – С. 58 – 65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_4_11.

4. Ziegler J.C. Optimum settings for automatic controllers / J.C. Ziegler, N.B. Nichols //ASME. Transactions, 1942. – Vol. 64. – № 8. – P. 101 – 108.

5. Копелович А.П. Інженерні методи розрахунку автоматичних регуляторів / О.П. Копелович. - М.: ГНТІ, 1960. - 190 с.

МОДЕРНІЗАЦІЯ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЇ СИСТЕМИ З ТЕХНОЛОГІЄЮ ШІМ

Муха М.Й., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-2923-6733
Дранкова А.О., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000
Звєрьков Д.О., магістр
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *В роботі проведено аналіз суднових валогенераторних систем та їх режимів роботи виробництва ABB, їхні особливості на базі сучасної перетворювальної техніки, яка управляє роботою валогенераторної системи з регульованою частотою обертання головного двигуна судна. Визначені основні варіанти компоновки валогенераторних установок з метою модернізації суднових електроенергетичних систем. На базі математичної моделі синхронного генератора на постійних магнітах та силового частотного перетворювача електроенергії з використання технічних засобів зменшення гармонік суднової мережі живлення проведена енергетична оптимізація валогенераторної системи при зміні навантаження та швидкості гребного валу судна.*

Ключові слова: *аналіз суднових валогенераторних систем, перетворювач частоти з ШІМ технологією, синхронний генератор з постійними магнітами, оптимізація режимів.*

REFITTING OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER PLANT USING A SHAFT GENERATOR SYSTEM WITH PWM TECHNOLOGY

Mykola Y. Mukha, Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-2923-6733
Alla O. Drankova, PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-2072-1599
Denis O. Zverkov, Master Student
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *The paper analyzes the ship's shaft generator systems manufactured by ABB and their operating modes, their features based on modern converter equipment, which controls the operation of the shaft generator system with a variable speed of rotation of the vessel main engine. The main options for the equipment configurations of shaft generator sets for the purpose of ship electric power systems refitting are determined. Based on a mathematical model of a synchronous generator on permanent magnets and a power frequency converter of electricity using technical means for reducing the harmonics of the ship's power supply network, energy optimization of the shaft generator system was carried out when changing the load and speed of the ship's propeller shaft.*

Keywords: *ship shaft generator systems analysis, frequency converter with PWM technology, synchronous generator with permanent magnets, optimization of modes.*

Підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем останнім часом здійснюється за рахунок використання потужності головних двигунів для виробництва електроенергії. Саме використання валогенераторних систем (ВГС) на суднах дозволяє знизити вартість електроенергії та експлуатаційні витрати. Одними із основних показників доцільності використання валогенераторних установок (ВГУ) у складі суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) є зниження вартості електроенергії в середньому на 15÷20% та загальне зниження викидів парникових газів до 2-5% в атмосферу від суден [1 – 3].

При впровадженні ВГС провідні суднобудівники вирішують проблему стабілізації частоти та напруги на ВГУ різними способами. У цьому контексті на сучасних суднах ви-

користовуються різні типи валогенераторних установок, зокрема валогенераторні агрегати з асинхронним і синхронним генератором.

В роботах [1,2,4-7] розглядаються варіанти модернізації вже діючих пропульсивних установок з метою оптимізації їхніх режимів роботи, розробку нового покоління ВГУ. Розглядаються основні методи стабілізації напруги та частоти, конструкція та принцип роботи валогенераторів (ВГ), основні режими роботи ВГ з синхронним ВГ і напівпровідниковим перетворювачем.

Наразі на більшості сучасних суден встановлюються валогенераторні установки.

Як відомо [1, 8-11], ВГУ використовуються як на суднах, де використовується гвинт з регульованим кроком (CPP) як рушійна установка, так і на суднах із гвинтом з фіксованим кроком (FPP). Валогенераторні установки на суднах із CPP є найпоширенішими на морському флоті. На суднах із CPP і ВГС використовуються два методи керування головним двигуном:

1) керування головним двигуном відповідно до валогенераторної характеристики. У цій версії швидкість судна регулюється шляхом зміни кроку гвинта, при цьому швидкість обертання головного двигуна залишається сталою;

2) управління головним двигуном за комбінаторними характеристиками. У цій версії швидкість судна змінюється шляхом одночасного регулювання крокового співвідношення та швидкості обертання гвинта.

Комбінаторний метод керування є економічним, але в цьому випадку необхідно вимкнути ВГУ, оскільки частота виробленої електроенергії змінюється. Слід зазначити, що наразі ВГУ на суднах з CPP працюють переважно з постійною швидкістю обертання. Вони простіші за конструкцією, мають високу ефективність і хорошу вагу та розміри. Однак ефективність силової установки все ще може бути підвищена, якщо при зменшенні навантаження на головний двигун одночасно змінюється кут обертання лопатей CPP, тобто зберігається оптимальне співвідношення швидкості обертання та кроку гвинта. При такому управлінні споживання палива та мастила зменшується, а економічний вплив на судна з CPP може зрости до 20% [4]. Для досягнення такого економічного ефекту на суднах з CPP і ВГ необхідно стабілізувати частоту струму валогенератора при регулюванні швидкості обертання головного двигуна. Стабілізація частоти струму ВГ може здійснюватися за допомогою планетарних передач або напівпровідникових частотних перетворювачів (PP). Однак ці стабілізуючі елементи збільшують вагу та розміри ВГУ, знижують її ефективність і ускладнюють обслуговування установки.

Останніми роками багато пишуть про доцільність використання валогенераторних установок на суднах з синхронними генераторами CPP [2, 4 – 7], вартість впровадження яких з типовим валогенератором коштуватиме близько $450 (USD) за кВт. Залежно від необхідної потужності та типу судна, оцінено, вартість впровадження становитиме від $520,000 до $3,500,000 (USD) [8].

Використання напівпровідникових частотних перетворювачів дозволяє розширити їхню функціональність і впровадити такі режими роботи: автономний генератор, генератор паралельно з допоміжними дизельними генераторами (PTO), автономний двигун, рух разом із головним двигуном (PTI, PTH). Традиційна конструкція установки включає синхронний валогенератор, частотний перетворювач.

Найбільший потенціал зниження витрати палива та викидів є для валогенераторів із функціоналом PTO, тому що валогенератор сприяє підтримці потужності головного двигуна і має здатність замінювати виробництво енергії дизель-генераторами (ДГ). Крім того, менші, але все ж значні скорочення можна очікувати для звичайних конфігурацій, де валогенератор виключно замінює допоміжну потужність ДГ.

Зниження викидів також залежатиме від типу встановленого обладнання. Якщо головний двигун – двотактний, а допоміжні дизелі – чотиритактні, зниження викидів потенційно значне, оскільки енергія може генеруватися більш ефективним головним двигу-

ном. Енергоефективність PTO має розглядатися в контексті конструкції гребного гвинта та експлуатації судна. Якщо на судні є гвинт з регульованим кроком (CPP) і PTO без частотного перетворювача, гребний вал має працювати на постійних обертах, щоб отримати необхідну мережеву частоту від вихідної потужності PTO (50 або 60 Гц). Коли судно рухається на знижених швидкостях потрібно змінити крок гвинта, щоб зменшити силу руху, оскільки оберти постійні. Це призводить до зміни тиску та кавітації, що знижує ефективність гвинта. Щоб уникнути цього, можна встановити PTO з частотним перетворювачем, щоб гребний вал не потребував роботи на постійних обертах і підвищував енергоефективність судна.

Основні переваги синхронних генераторів з постійними магнітами (PMSG) порівняно з традиційними синхронними генераторами (EESG) такі:

- вища ефективність (у межах навантаження) (від 3 до 6% — залежно від навантаження [11]),
- легко отримати велику кількість пар полюсів, PMSG повільна швидкість) може встановлюватися без коробок передач (втрати від коробки передач — близько 2% [11]),
- менша вага та розміри,
- висока експлуатаційна надійність і проста конструкція,
- вища щільність потужності,
- низький рівень вібрацій.

Таким чином валогенератор є найбільш практичним рішенням, якщо він обладнаний частотно-регульованим приводом (VFD). Завдяки цьому валогенератор можна використовувати в ширшому діапазоні швидкостей. Експлуатаційну гнучкість існуючого валогенератора також можна значно покращити, модернізувавши його за допомогою VFD для керування (стабілізації) вихідними параметрами валогенератора.

В даній роботі розглядається валогенераторна система, в якій на лінії гребного валу судна встановлений синхронний генератор з постійними магнітами (PMSG) та частотний перетворювач енергії (Frequency Converter), що являє собою привод валогенератора (SGD), рис. 1.

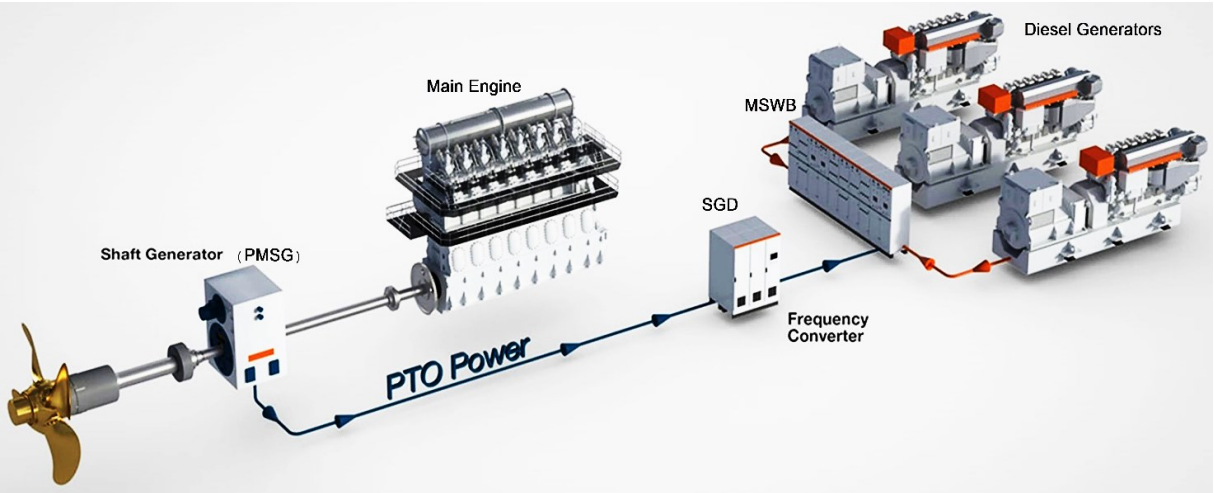


Рисунок 1 – Загальна конфігурація валогенераторної системи з PMSG та Frequency Converter (SGD)

Валогенератор з регульованою частотою обертання (VSSG) - це валогенератор, підключений до приводу з регульованою частотою обертання (SGD), що дозволяє виробляти електроенергію незалежно від швидкості обертання гребного валу (Main Engine). Основною функцією VSSG є подача електроенергії в суднову мережу живлення (MSWB). Такий режим роботи валогенератора називається PTO (Power Take Off).

Отже, валогенераторна система складається з електричної машини (PMSG), блоку управління і SGD. Крім того валогенераторна система також може бути оснащена трансформатором, автоматичними вимикачами та підрулюючими двигунами.

В свою чергу до складу SGD входить перетворювач, підключений до електричної машини, називається перетворювачем обертових машин (RMC). Відповідно, перетворювач, підключений до суднової мережі через фільтр LCL, називається перетворювачем суднової мережі (SNC). Подання базової конфігурації системи валогенератора показано на рис. 2.

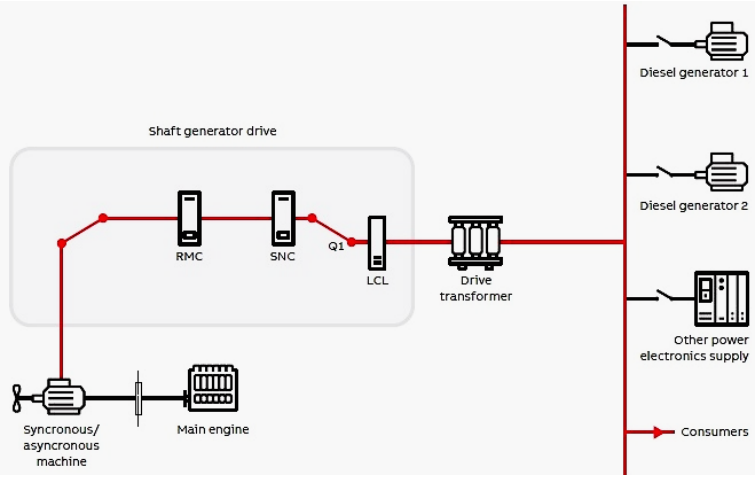


Рисунок 2 - Базова система валогенератора і привода валогенератора (SGD)

В режимі відбору потужності (PTO mode) енергія береться від механічного обертання валу, який приводить у рух гребний гвинт. Активна потужність, необхідна для роботи мережі, виробляється головним двигуном (Main Engine).

Модернізація суднової електроенергетичної системи (CEEC) в даній роботі виконана з використанням мультиприводного блоку випрямлячів на IGBT-транзисторах серії ACS880MDCL з водяним охолодженням виробництва фірми ABB.

В режимі відбору потужності приводи валогенераторів можуть працювати паралельно з іншими допоміжними генераторами, як показано на рис. 3, або в автономному режимі, будучи єдиним джерелом живлення в мережі, як показано на рис. 4.

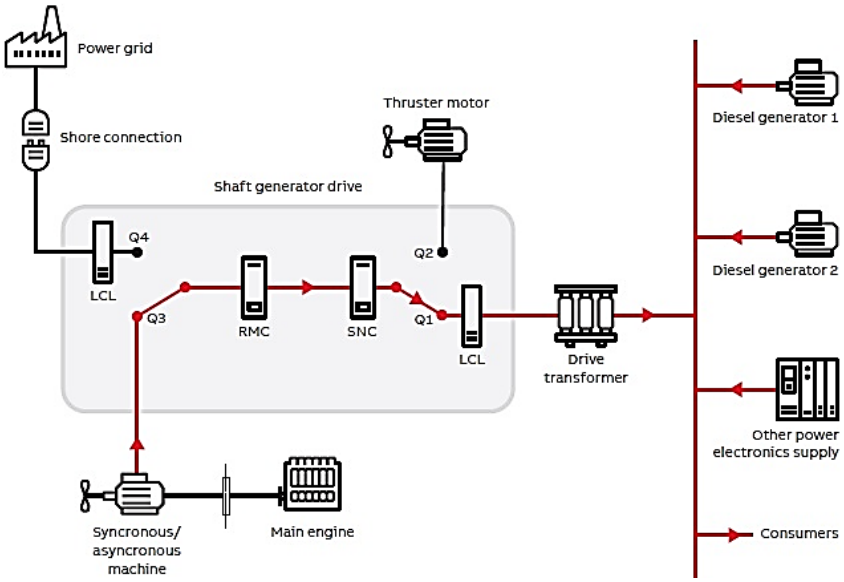


Рисунок 3 – PTO режим, паралельний з іншими джерелами силової електроніки 6. та допоміжних генераторів

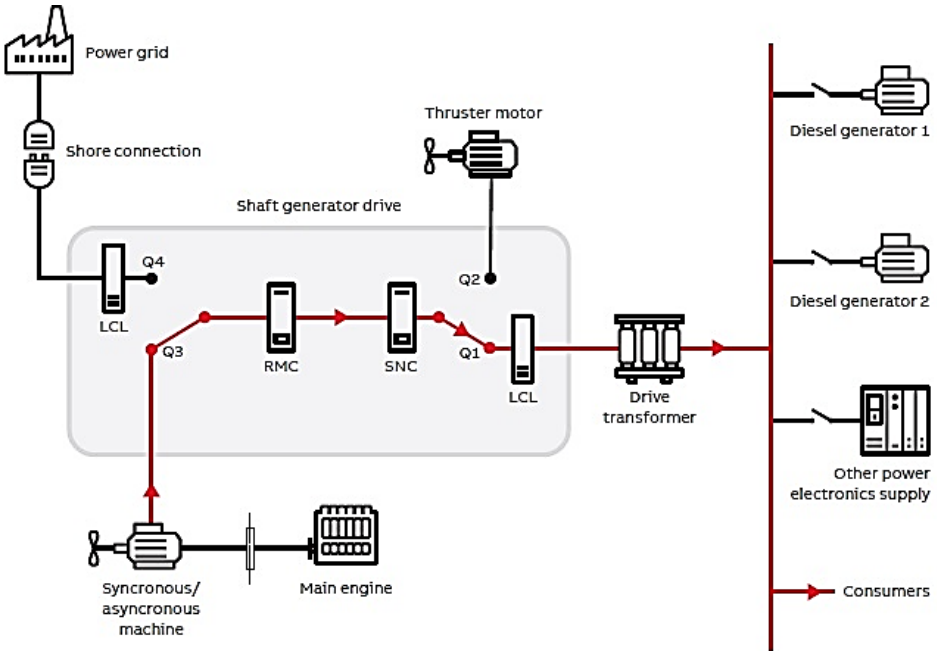


Рисунок 4 – Режим PTO, створює і підтримує автономний режим роботи мережі

RMC управляє напругою на лінії постійного струму, щоб підтримувати її в межах заданого діапазону. RMC може бути діодним мостом (INU,) або, в деяких випадках, IGBT модулем живлення (ISU). За допомогою діодного випрямляча автоматичний регулятор напруги синхронної машини (AVR) забезпечує вхідний змінний струм і, таким чином, рівень випрямленої напруги ланцюга постійного струму. SNC зазвичай працює як ISU, керований штатною судновою системою керування електростанцією (PMS), або самостійно, або паралельно з іншими джерелами живлення. ISU може одночасно керувати або лінією постійного струму, або напругою змінного струму. В режимі відбору потужності ISU, керований PMS, знаходиться у режимі керування змінною напругою, і ISU не регулює постійної напруги, яке має бути передане RMC.

Для усунення проблем із підтримкою постійних параметрів напруги, що генерується PMSG при зміні швидкості та навантаження гребного валу, необхідно використовувати потужні електронні перетворювачі енергії.

На рисунку 5 показано функціональну схему валогенераторної системи з PMSG, де такі позначення:

- ME - Головний двигун,
- PMSG — Постійний магнітний синхронний генератор,
- AR — активний випрямляч,
- ARC — це активна система керування випрямлячем,
- C - конденсатор постійного струму.

Електромагнітні процеси в системі досліджуються на основі еквівалентної схеми заміщення, рис. 6.

У цій еквівалентній схемі (рис. 6.) AR представлений керованим джерелом напруги (U_1), який підключений паралельно до обмоток статора PMSG з E_1. Внутрішніми параметрами машини є індуктивний та активний опір у схемі заміщення. Математичний опис PMSG здійснено в синхронно обертовій системі координат (x, y) за допомогою методу узагальненого (результуючого) вектора [9,10] та методу «головної складової» [3,9]. Цей математичний опис виглядає так:

$$\overline{E}_G(t) = \overline{U}_1(t) + L_1 \frac{d\overline{I}_1(t)}{dt} + r_1 \overline{I}_1(t) + jx_1 \overline{I}_1(t) \qquad (1)$$

де:

$\overline{E}_G(t) = j\overline{\psi}_0\omega(t)$ - просторовий вектор електрорушійної сили (ЕРС) на обмотках статора;

$\overline{U_1}(t)$ - просторовий вектор напруги в колі змінного струму;

$\overline{I}_1(t)$ - просторовий вектор струму в обмотках статора;

r_1, L_1 – опір та індуктивність машини;

$x_1 = \omega L_1$ – реактивний опір машини;

$\grave{u}$ - кутова частота напруги PSC.

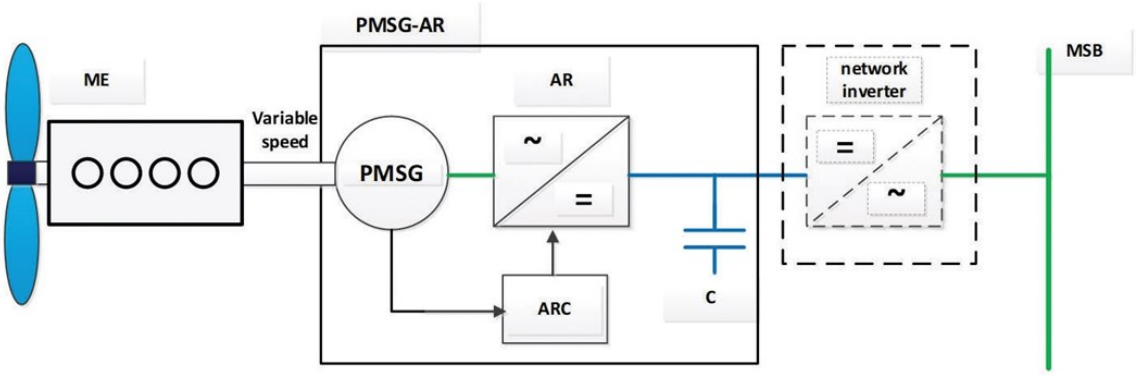


Рисунок 5 - Блок діаграма валогенераторної системи з PMSG

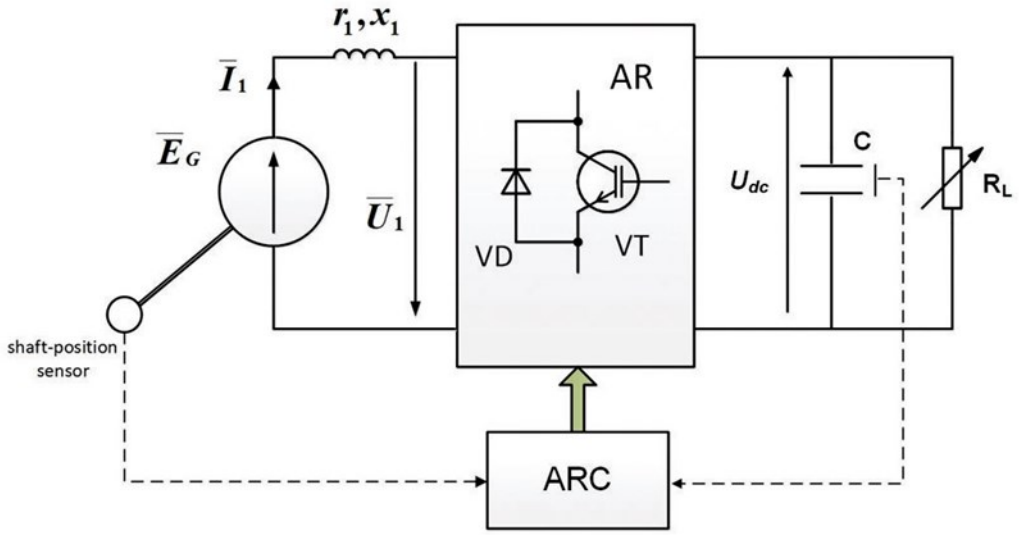


Рисунок 6 – Еквівалентна схема PMSG

Нижче розглядається спосіб керування машиною, при якому джерелом керуючого струму виступає активний випрямляч.

Основна статична характеристика, яка представляє собою залежність вихідної напруги AR від коефіцієнта модуляції m і фази модуляції φ_m, визначається:

$$U_{dc} = \frac{\frac{3}{4} m E_1 \frac{R_L}{z^2}(r_1 cos\varphi_m + x_1 sin\varphi_m)}{1 + \frac{3}{8} m^2 \frac{r_1 R_L}{z_1^2}} = \frac{\frac{3}{4} p\omega_m \Psi_0 \frac{R}{z^2}(r\, cos\varphi_m + x\, sin\varphi_m)}{1 + \frac{3}{8} m^2 \frac{r_1 R_L}{z_1^2}} \quad (2)$$

Де: R_L- опір навантаження, $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$- повний опір PMSG і AR на стороні змінного струму. На рис. 7 показано залежності вихідної напруги AR від коефіцієнта модуляції та фази модуляції для двох швидкостей вала машини 100 рад/с та 150 рад/с.

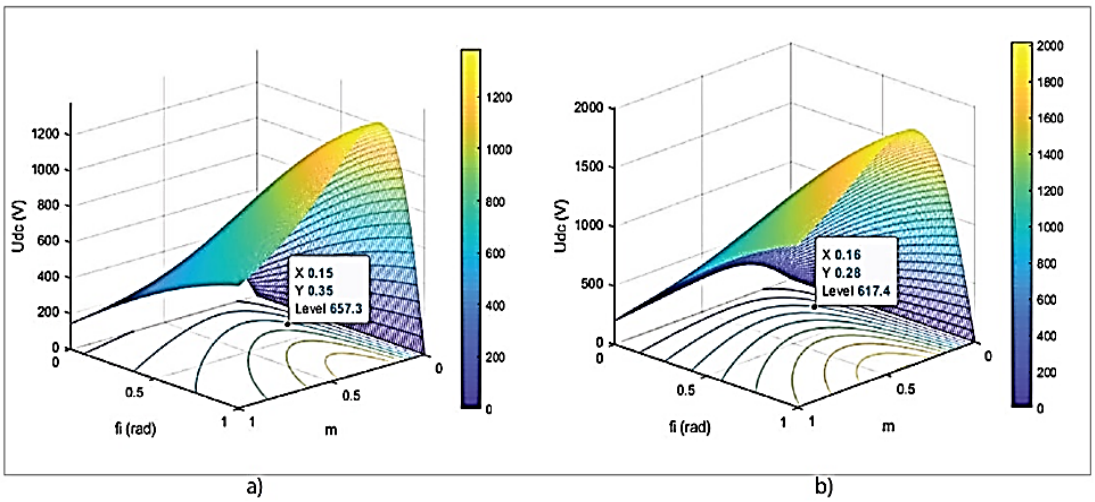


Рисунок 7 – Вихідна напруга AR на коефіцієнті модуляції (m) та фазі модуляції (fi) для двох швидкостей вала машини (a) 100 рад/с і 150 рад/с (b)

На рис. 8 наведено результати розрахунку енергетичних характеристик, які представлені залежностями активної та реактивної потужності на виході PMSG від сигналів керування.

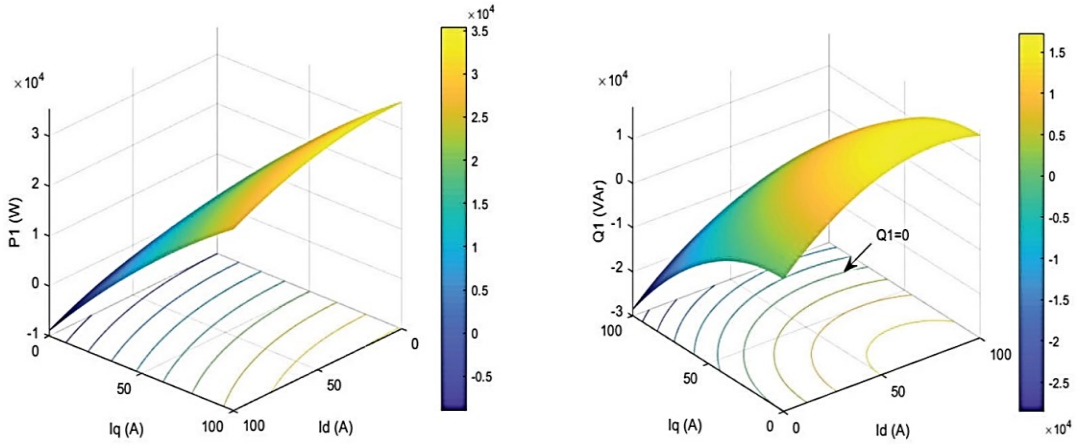


Рисунок 8 – Енергетичні характеристики струмового керування PMSG

Отримані енергетичні характеристики струмового керування PMSG дозволяють оцінити властивості системи, які зводяться до наступного:

- активна потужність у навантаженні PMSG в генераторному режимі залежить в основному від складової струму I_q і незначною мірою від складової I_d;

- реактивна потужність у навантаженні PMSG порівнянна з активною потужністю, що викликає збільшення повного струму і втрат у напівпровідникових AR і обмотках PMSG;

- для підтримки нульової реактивної потужності в навантаженні PMSG необхідно підтримувати певну нелінійну залежність між I_q і I_d;

- діапазон зміни керуючого сигналу при нульовій реактивній потужності в навантаженні PMSG для обраної машини обмежений значенням $I_q \leq 70A$;

- при регулюванні тільки по активній складовій ($I_d = 0$) реактивна потужність у всьому діапазоні зміни I_q залишається від'ємною. В даному випадку AR для PMSG є активним ємнісним навантаженням.

Енергетичні характеристики оптимізованого валогенератора з PMSG представлені на рис. 9.

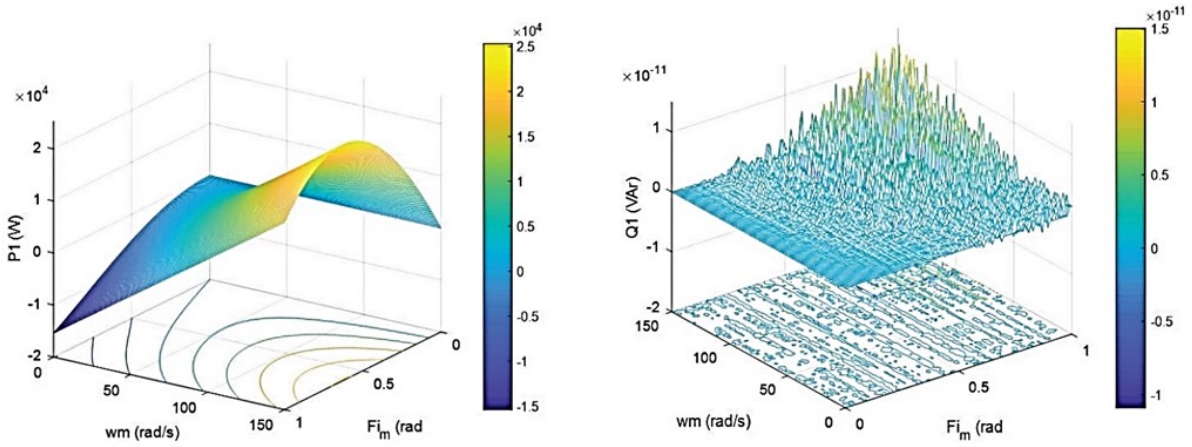


Рисунок 9 – Оптимізовані енергетичні характеристики генератора

Результати проведеного моделювання показують, що генераторна установка з PMSG забезпечує основні вимоги – підтримувати постійну напругу при зміні струму (потужності) у навантаженні та зміні швидкості обертання гребного валу. Перехідні енергетичні і електромагнітні процеси в оптимізованій системі при зміні, наприклад, швидкості PMSG наведені на рис. 11.

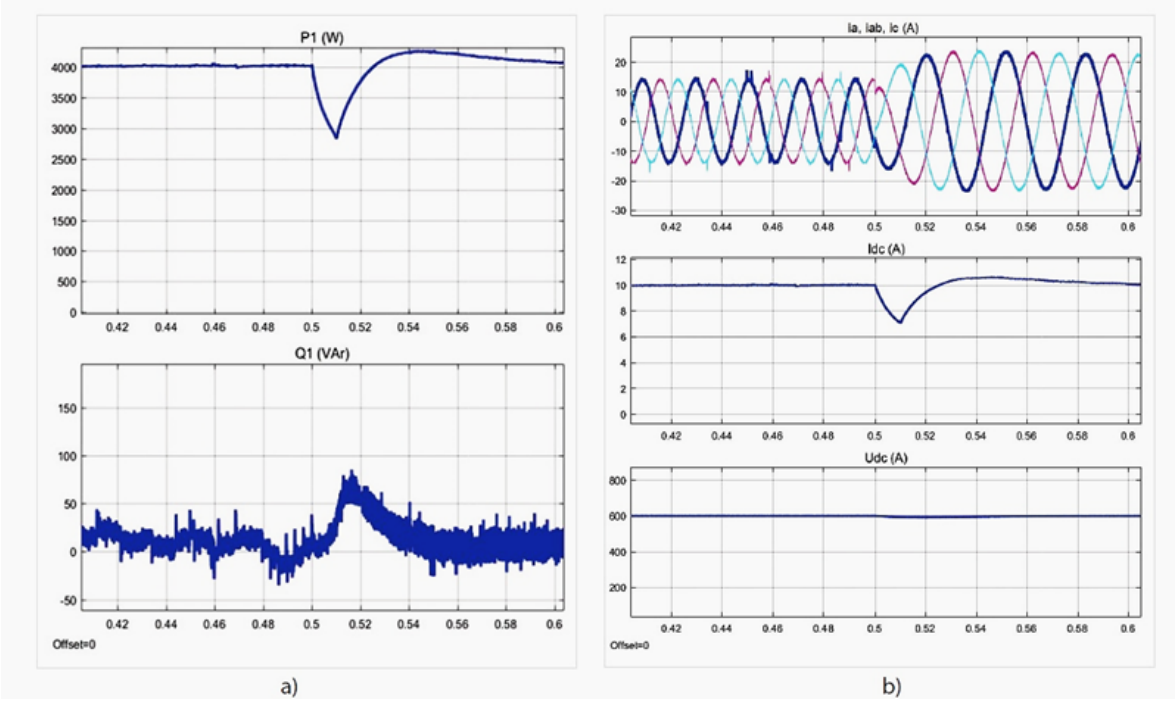


Рисунок 11 - Перехідні енергетичні і електромагнітні процеси в оптимізованій системі при зміні швидкості PMSG

Висновки. Дослідження електромагнітних та електромеханічних властивостей в усталеному режимі системи PMSG-AR дозволило оцінити працездатність системи валогенератора при зміні частоти обертання валу та навантаження. Запропоноване керування AR дозволило оптимізувати систему валогенератора за рахунок зниження реактивної потужності в системі PMSG-AR. Реактивні струми і, відповідно, втрати в перетворювачі і машині можуть бути в кілька разів меншими при певному співвідношенні амплітуди і фази напруги (струму) на стороні змінного струму AR. Оптимізація енергетичних властивостей генераторних установок набуває особливого

значення при побудові потужних гібридних транспортних систем і систем з повною електричною тягою. Ці системи мають різні за потужністю джерела електричної енергії, що працюють на сумарному змінному навантаженні. Прикладами таких об'єктів є наземний, морський, річковий і повітряний транспорт, а прикладами таких джерел електричної енергії - дизель-генератори, валогенератори, паро- і турбогенератори, акумулятори, суперконденсатори та ін.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO: Improving the energy efficiency of ships https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx

2. MAN Energy Solutions/Shaft generators for low speed main engines. 5510-0003-03ppr Apr 2021, 27 p. https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_12

3. J. Prousalidis, C. Patsios, F. Kanellos, A. Sarigiannidis, N. Tsekouras, and G. Antonopoulos, "Exploiting shaft generators to improve ship efficiency," in Proc. Int. Conf. Elect. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propuls. Road Vehicles (ESARS), Oct. 2012, pp. 1–6.

4. https://shipnerdnews.com/the-2-main-shaft-generator-technologies-available-now/

5. Trong T., Duc M., Ngo Q-V. The Power-Sharing System of DFIG-Based Shaft Generator Connected to a Grid of the Ship. IEEE Access, 2021, pp. 1 - 11. 10.1109/ACCESS.2021.3102659. https://scholar.google.com/scholar?as_q=The+Power-Sharing+System+of+DFIG-Based+Shaft+Generator+Connected+to+a+Grid+of+the+Ship&as_occt=title&hl=en&as_sdt=0%2C31

6. ABB white paper: Towards an energy efficient future for shipping/ High efficiency ABB permanent magnet shaft generator solutions https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108466A6782&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch .

7. J M Prousalidis, E Xanthopoulos & K Voutzoulidis (2009) Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators, Journal of Marine Engineering & Technology, 8:1, 21-38, https://doi.org/10.1080/20464177.2009.11020216

8. A. Sarigiannidis, A. Kladas, E. Chatzinikolaou, and C. Patsios, "High efficiency shaft generator drive system design for Ro-Ro trailer-passenger ship application," in Proc. Int. Conf. Elect. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propuls. Road Vehicles (ESARS), Mar. 2015, pp. 1–6.

9. MATLAB SCHOOL. Virtual laboratory for power electronics and electromechanical devices in Matlab+Simulink software. Lesson 26: Optimization of energetic properties of mechatronic system by means of electric machine with power electronic, Magazine „Power electronics" Vol. 3, No 72, pp. 68-75, 2018, (ISSN 2079-9322).

10. T. Friedli, M. Hartmann and J. W. Kolar, "The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part II," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, pp. 543-560, Feb. 2014.

11.Halvor Schøyen, Hussein Sow, "A decision making tool concerning retrofit of shaft generator frequency converter". J. Ocean Engineering, vol. 109 (2015), p.p.103–112. https://www.sciencedirect.com/journal/ocean-engineering

ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДІЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУДЕН ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

Дубовик В.О., ст. викладач,
https://orcid.org/0009-0001-6571-1140
Самонов С.Ф., к.т.н., доцент,
https://orcid.org/0000-0002-8984-0393
Кульбацький А.А., к.т.н., ст. викладач
Національний університет «Одеська морська академія»
Дудко С.А., електромеханік

Анотація: *У роботі розглянуті питання використання нетрадіційних джерел енергії для забезпечення суден електроенергією в період їх стоянки в прилеглих зонах. Запропоновані шляхи зменшують забруднення навколишнього середовища за рахунок використання сонячної, вітрової та хвильової енергії. Представлені хвильова та гібридна електростанції, які використовуються на морських платформах.*

Ключові слова: *акумуляторні батареї, декарбонізація, енергозабезпечення, нетрадіційні джерела енергії, хвильова електростанція, гібридна електростанція, екологія.*

USE OF NON-TRADITIONAL ENERGY SOURCES TO PROVIDE ELECTRICITY TO VESSELS

Dubovyk V., Senior Lecturer
https://orcid.org/0009-0001-6571-1140
Samonov S., PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-8984-0393
Kulbatsky A., PhD, Senior Lecturer
National University Odessa Maritime Academy
Dudko S., electrical engineer

Abstract: *The paper considers the issues of using non-traditional energy sources to provide ships with electricity during their parking in nearby areas. The proposed paths reduce environmental pollution through the use of solar, wind, and wave energy. Wave and hybrid power plants used on offshore platforms are presented.*

Key-words: *batteries, decarbonization, power supply, non-traditional energy sources, wave power plant, hybrid power plant, ecology.*

В теперешній час впроваджуються рамкові конвенції ООН, регламенти міжнародної морської організації, міжнародні договори для поширення правил запобігання забрудненню навколишнього середовища, а саме зменшення викидів парникових газів. Регіональні та міжнародні екологічні практики, правила і норми покликані забезпечити глобальний перехід до екологічно чистого морського транспорту. На сьогодні існують багато цільових програм, які направлені на використання «зелених» технологій. Тому декарбонізація націлена на використання в морській галузі та в суднових електроенергетичних комплексах різноманітних джерел енергії та інновацій.

Значний інтерес у зв'язку з запобіганням забруднення навколишнього середовища, економією паливо-мастильних матеріалів на суднах і підвищенням їх енергоефективності є використання нетрадиційних джерел енергії (сонячної, вітрової, хвильової) спільно з накопичувачами електроенергії [1,2].

Регламентом (ЄС) 2023/1805 (FuelEU Maritime) запроваджено поступове скорочення викидів від морського палива – від 2% у 2025 році до 80% у 2050 році шляхом впровадження кліматично нейтрального альтернативного палива. Це сприяє розвитку низько-

вуглецевих технологій у судноплавстві в межах загальної стратегії декарбонізації ЄС. На міжнародному рівні до кліматичних ініціатив ЄС, у 2023 році Міжнародна морська організація ухвалила оновлену GHG Strategy, яка передбачає зниження викидів парникових газів у судноплавній галузі до нуля приблизно до 2050 року. Зокрема: до 2030 року – скорочення викидів на 20-30%; до 2040 року — на 70-80% [4].

Прикладом сучасного суднобудування є спущене на воду в травні 2025 року в Австралії найбільше у світі судно «China Zorrilla», яке працюватиме повністю на акумуляторній електростанції, оснащеній 250 тонами акумуляторів і має можливість перевозити до 2100 пасажирів та 225 транспортних засобів (рис.1). Система накопичення енергії має потужність 40 МВт/год. Система передає енергію вісьмом водометним двигунам фірми Wartsila. Судно довжиною 130м та шириною 32м є найбільшим електричним транспортним засобом у світі та має енергетичну систему, яка вчетверо перевищує потужність будь-якої попередньої морської установки [5]. Судно буде здійснювати маршрути між портами Аргентини та Уругваю.

Рисунок 1 – Загальний вигляд судна «China Zorrilla»

Тому забезпечення суден електроенергією на період стоянки є актуальним і важливим питанням для вирішення зменшення забруднення навколишнього середовища. А також, враховуючи той факт, що в майбутньому зростатиме кількість суден, які в складі суднових електростанцій використовуватимуть основним живленням акумуляторні батареї [3], буде виникати проблема їх підзарядки.

Прогрес у застосуванні «зелених» технологій може поширюватись не тільки на судна [1], а і в прибережних та прилеглих зонах: стоянка на рейді, на якірній стоянці або стоянках суден біля плавучих засобів утримування (швартовні бочки). В цих місцях та на морських, річкових платформах можуть розташовуватись сонячні, вітрові та хвильові електростанції, які забезпечують живлення електроенергією суден, а також зарядку акумуляторних батарей, якими оснащені судна з електрорухом.

Науковці різних країн проводять дослідження та розробки можливості використання альтернативних джерел енергії. Проекти використання енергії хвиль розробляють та реалізовують інженери Японії, Австралії, США, України, Швеції та інші. В таких проектах за основу розрахунків береться потужність фронту хвиль: чим більшою є хвиля, тим краще. За середньою висотою хвиль у Світовому океані 2,5м і періоді 8с питомий потік енергії, який припадає на 1м фронту хвилі, складає 75 кВт/м. Питомий потік енергії вітрових хвиль, наприклад, в Азовському морі - 3 кВт/м, Чорному - 6-8 кВт/м [6].

Розроблена українськими спеціалістами хвильова електростанція ефективна тим, що базується на принципі використання поштовху хвиль різної сили. Основу конструкції

становлять 3 понтонні платформи, що з'єднані між собою. Дві платформи, гойдаючись на хвилях, передають свій рух через відповідні важелі на систему турбін. У свою чергу система турбін приводить в дію генератори, що виробляють електроенергію. У розробці впроваджено принцип використання поштовху хвиль різної сили, тому установку можна виготовляти із врахуванням особливостей різних акваторій. Ширина такої установки може становити приблизно від 35м до 65м, а довжина сягати від 100 до 200м [7,8].

Хвильові електростанції можуть бути різноманітними, а саме: поплавкові хвильові електростанції виробляють енергію завдяки руху плаваючого поплавка при піднятті його хвилею; турбінні — завдяки обертанню турбіни, що приводиться в дію повітрям, яке витісняється хвилею зі спеціальної камери; гідравлічні — завдяки руху гідравлічних поршнів у конвертерах.

Шведська компанія NoviOcean розробляє гібридний перетворювач енергії, який використовує об'єднані ресурси хвиль, вітру та сонця для виробництва чистої енергії. Електростанція, яка представлена на рисунку 2, має довжину 38м, на якій встановлені вітряні турбіни та сонячні панелі. Прямокутний пліт лежить на хвилях, а внизу знаходиться заповнений водою циліндр з'єднаний з морським дном за допомогою поршневого штока та кабелю. Якорі утримують її розташування на місці. Нагорі плоту розташовані шість вертикальних вітрових турбін, що генерують 300 кВт. Їх доповнюють сонячні панелі, що виробляють 50-80 кВт, що загалом досягає близько 1 МВт. Середній коефіцієнт потужності складає 40%.

Хвильова електростанція функціонує за принципом насоса: при підйомі плоту вода закачується вгору і з великою швидкістю прямує на лопаті турбіни Пелтона, рухаючи її. Енергія обертання турбіни перетворюється на електрику. Ця конструкція поєднує у собі перевірені інженерні рішення з інноваційними розробками, включаючи запатентовану систему [9,10].

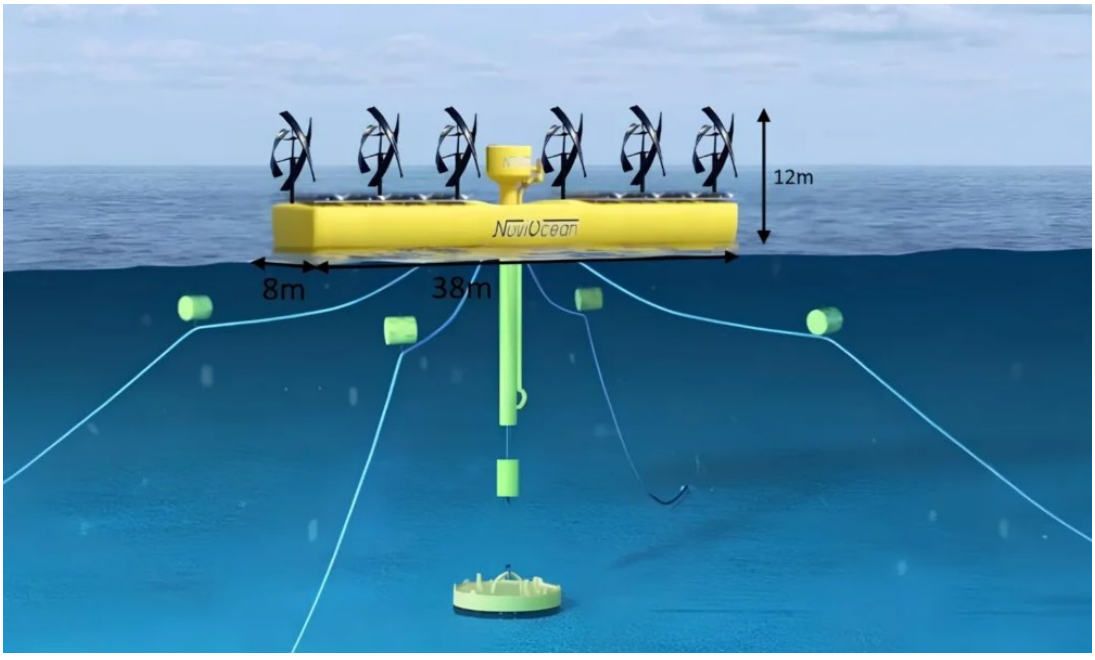


Рисунок 2 – Гибридна електростанція компанії NoviOcean

Електростанція NoviOcean поєднує енергію хвиль, вітру та сонця в одному рішенні, забезпечуючи генерацію енергії навіть тоді, коли нема сонця та вітра. Це знижує нормовану вартість електроенергії (LCOE) на ранній стадії [9,10].

Компанія планує розробити таку гібридну електростанцію, що поєднує хвильові та вітрові турбіни, а також сонячні панелі на узбережжі Північної та Південної Америки.

Морські платформи, на яких розташовується обладнання стикаються з необхідністю витримувати погіршення метереологічних умов, штормів. Вони ще залишаються дорогими, технічно складними та недостатньо розвиненими для широкого застосування та потребують подальших розробок.

До позитивних факторів хвильової енергії відносяться низький вплив на довкілля, значний сумарний потенціал, збільшення потужності в осінньо-зимовий період, а також забезпечують більш високе відношення потужності до ваги, ніж морські вітрові електростанції, а до недоліків – її переривчатість.

Висновки. 1. Необхідно розбудовувати інфраструктури альтернативних джерел енергії в морських, річкових портах, прилеглих та прибрежних зонах. 2. Розвиток альтернативних джерел енергії не повинен знижувати якість виробленої електроенергії. 3. Використання альтернативних джерел електроенергії залежить від погодних умов на морі та прибрежних, прилеглих зонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самонов С.Ф. Підвищення енергоефективності та надійності забезпечення суднових споживачів електроенергією/ С.Ф. Самонов, В.О. Дубовик, А.А. Кульбацький, С.А.Дудко // Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 19.11.2024 - 20.11.2024. – Одеса: НУ ОМА, 2024. – С.57-60.

2. Самонов С.Ф. Підвищення надійності енергозабезпечення річкових суден при проходженні мостів / С.Ф. Самонов, В.О. Дубовик, А.А. Кульбацький // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2023 - 23.11.2023. – Одеса: НУ ОМА, 2023. – С.92-95.

3. Самонов С.Ф, Кульбацкий А.А., Дубовик В.О. Перспективи використання твердотельних акумуляторних батарей на суднах/ Матеріали науково-методичної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.12.2018 - 06.12.2018. – Одеса:НУ «ОМА», 2018. – С.78-80.

4. https://epravda.com.ua/tehnologiji/dekarbonizaciya-sudnoplavstva-ta-portiv-804779/

5. https://ionity.ua/na-vodu-spushheno-china-zorrilla-najbilshyj-u-sviti-povnistyu-elektrychnyj-korabel/.

6. http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-7

7. https://www.elektrozahid.com.ua/en/news/563-hvyli.html

8. https://ua.patents.su/3-87918-morska-khvilova-elektrostanciya.html

9. https://noviocean.energy/2024/03/10/the-hybrid-plant-that-combines-wave-wind-and-solar-power/

10. https://noviocean.energy/2024/10/09/from-aviation-to-sustainability-jan-g-skjoldhammers-noviocean-revolutionizes-renewable-energy/

Секція 4. СУЧАСНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, КОМПОНЕНТИ ТА ДІАГНОСТИКА

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛКОННОЇ ОПТИКИ, ЯКА ІНТЕГРОВАНА У КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Опришко М.О., старший викладач
https://orcid.org/0000-0002-9385-8676
Національний університет "Одеська морська академія"

Анотація. *Конструкції з композитних матеріалів широко використовуються в суднобудуванні. Конструкції з композитних матеріалів часто експлуатуються в складних гідрометеорологічних умовах, які можуть генерувати усталісну деструкцію конструкцій. Ця обставина вимагає моніторингу технічного стану конструкцій у режимі реального часу. Діагностичний контроль, у даному випадку, орієнтований на виявлення, ідентифікацію, локалізацію й оцінку небезпеки дефектів, які можуть негативно вплинути на безпеку або експлуатаційні характеристики конструкції. Волоконно-оптичні датчики ефективніше за інших здатні вирішувати завдання діагностики й моніторингу технічного стану конструкцій, а також мають дуже компактні розміри, можуть бути вбудовані в такі структури, як розподілена інформаційно-вимірювальна система. Однак, існує актуальне науково-технічне завдання підвищення надійності волоконно-оптичних структур, інтегрованих у конструкційні матеріали.*

Ключові слова: *волоконний датчик, конструкційні матеріали, надійність*

ENHANCING THE RELIABILITY OF FIBER OPTICS INTEGRATED INTO STRUCTURAL MATERIALS

Opryshko M.O., Senior Teacher
https://orcid.org/0000-0002-9385-8676
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract. *Composite structures are widely used in shipbuilding. Composite structures are often operated in difficult hydrometeorological conditions that can generate permanent destruction of structures. This circumstance requires monitoring the technical condition of structures in real time. Diagnostic control, in this case, is focused on detecting, identifying, localizing and assessing the danger of defects that can negatively affect the safety or operational characteristics of the structure. Fiber-optic sensors are more effective than others in solving the tasks of diagnosing and monitoring the technical condition of structures, and also have very compact dimensions, can be built into structures such as a distributed information and measurement system. However, there is a pressing scientific and technical task of increasing the reliability of fiber-optic structures integrated into structural materials.*

Keywords: *fiber sensor, structural materials, reliability*

Найпоширенішими технологіями, використовуваними суднобудівними підприємствами в промисловому виробництві композитних конструкційних матеріалів, є методи ручного укладання й попереднього просочення. Метод ручного укладання являє собою процес розміщення шарів армованих волокном матеріалів у вигляді пошарового пакета з наступним доданням йому форми для одержання необхідної деталі. У цьому процесі армуючі волокна або тканини розміщаються шарами, між якими наноситься матриця. Після завершення укладання та полімеризації смоляної матриці багатошаровий композит здобуває необхідну форму відповідно до технічних вимог. Попередньо просочені матеріали (препреги) являють собою окремі шари композитних волокон, уже просочених матричним матеріалом, наприклад епоксидною смолою. У процесі їх використання кілька таких шарів укладаються один на одного, після чого здійснюється затвердження – або в природніх умовах, або із застосуванням тепла й/або тиску. Формування може бути вакуумним

(пакетне) або автоклавним. Стандартні автоклавні умови затвердження припускають діапазон температур 120 … 200 °С і тиск до 7 кПа.

Для інтеграції оптичних волокон (ОВ) у зразки, створені як методом ручного, так і попереднього затвердження, використовується схожий процес. Перед затвердженням ОВ розміщаються на відповідний шар композита. При цьому вони зазнають невеликої попередньої деформації для запобігання їх вигину. Розташування волоконно-оптичного датчика (ВОД) вибирається залежно від цілей використання й галузі, де потрібен моніторинг параметрів. Наприклад, при вимірі деформації й температури в композитних структурах відзначається, що датчики інтегрують у найбільш віддалений від центрального шар для підвищення чутливості. Візуальна демонстрація етапів ручного укладання ВОД представлено на рис. 1, *a* і 1, *b*. При роботі з великими композитними деталями ОВ можуть інтегруватися вручну фахівцем, як показано на рис. 1, *c* [1, 2].

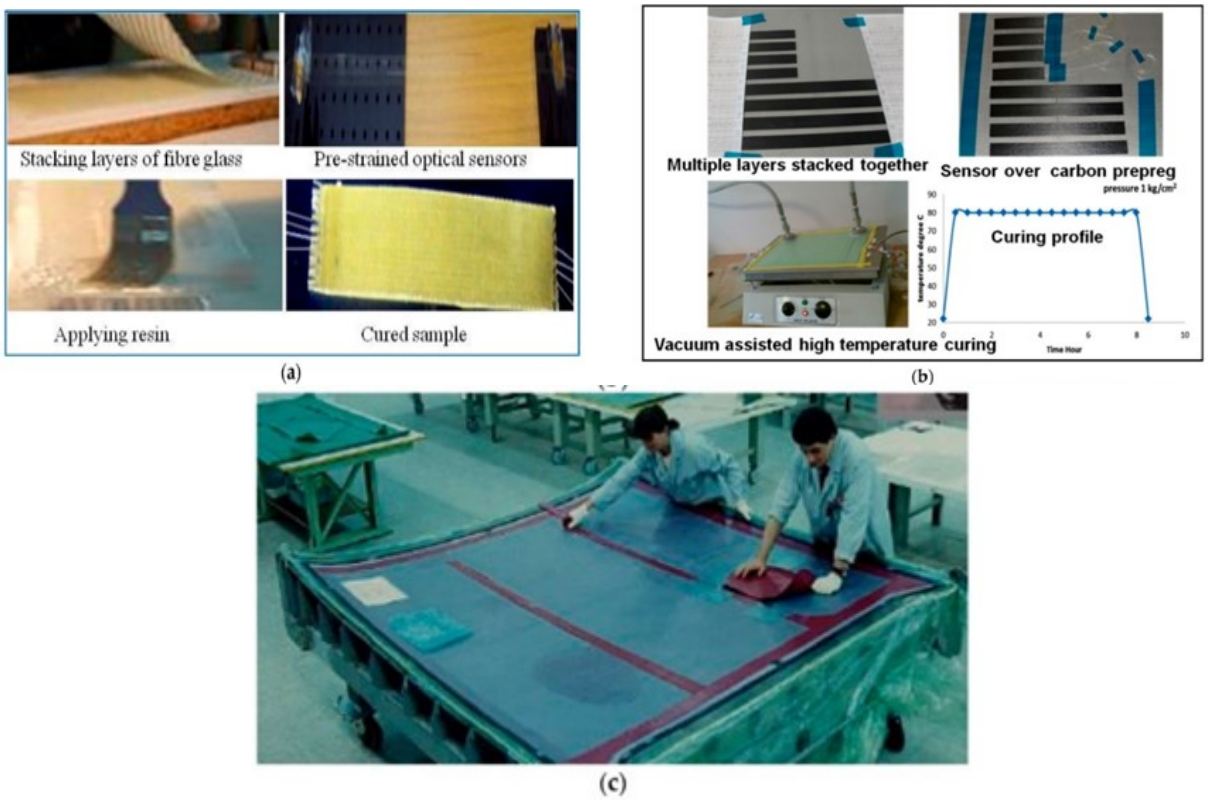


Рисунок 1 – Інтеграція волоконно-оптичних датчиків у конструкційні матеріали:
a – ручне укладання; *b* – метод попереднього просочення;
c – виготовлення композитної деталі з інтергацією ВОД [1]

Однак для масового виробництва інтелектуальних композитних матеріалів із вбудованими ВОД доступні автоматизовані роботизовані системи. Одним із ключових викликів при імплементації ВОД у композитну конструкцію залишається вплив цих датчиків на загальну структурну цілісність деталі.

Однієї із ключових завдань при інтеграції ВОД у композитні матеріали залишається мінімізація погіршення їх механічних характеристик, а також зниження ризику деструкції через наявність вбудованих ОВ. У ході різних досліджень аналізувалося вплив вбудованих ВОД на такі властивості композитів, як міцність при розтяганні й стиску, твердість, міжшарова в'язкість руйнування, усталісна міцність та інші параметри. Установлено, що впровадження ОВ, що проходять через шари або розташованих паралельно їм, не виявляє помітного впливу на статичну міцність матеріалу. Даний висновок залишається чинним навіть для волокон, що містяться у найбільш уразливих зонах конструкції. У цілому будь-які потенційні зміни міцності й модуля пружності композита залежать від таких факторів,

як орієнтація ОВ щодо сусідніх шарів, загальна товщина матеріалу, діаметр волокна, а також вид захисного покриття на ньому.

Зі збільшенням кута між ОВ і напрямками шарів спостерігається посилення деградації. Додатковою складністю є більший діаметр ОВ, включаючи його буферне покриття, у порівнянні з багатошаровими волокнами композитного матеріалу. Звичайно комерційні ОВ мають діаметр у діапазоні 125 … 230 мкм, що приблизно в десять-п'ятнадцять раз перевищує діаметр Е-скловолокна або вуглецевого волокна. Укладання ОВ перпендикулярно армуючим шарам може формувати характерні осередкові візерунки або "кишені" усередині смоли, які виступають центрами зародження дефектів у композитній структурі. Утворювання подібних центрів створює передумови для передчасного руйнування матеріалу у вигляді розшарування [1, 2].

Якщо ОВ розташовуються уздовж напрямки армуючих волокон, забезпечується рівномірне ущільнення навколо волокна з мінімальними дефектами, що дозволяє механічним властивостям пакету зберігатися практично без змін. Крім цього, укладання ОВ за напрямком армування впливає на механічні характеристики композитної конструкції завдяки їхній власній несучій здатності [2 - 6].

Аналіз [6] міцності на вигин для композиційного матеріалу із вбудованим ВОД, здатним витримувати розтягувальне навантаження, продемонстрував наступні результати. Установка ВОД у зону розтягання, як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку, не привела до істотного погіршення міцності на вигин. Аналогічна картина спостерігається й при стискаючому навантаженні, якщо датчик інтегрований уздовж поздовжньої осі. Однак виявлено, що розміщення ВОД поперечно до напрямку області стиску викликає значне зниження міцності на вигин [7].

Однак, у ОВ діаметру 125 … 230 мкм можливий тільки багатомодовий режим, який сполучений з явищем та наслідками міжмодової дисперсії. Міжмодова дисперсія значно обмежує інформаційну пропускну здатність усього вимірювального тракту й змушує використовувати низькоефективні світловипромінюючі діоди (СВД) як джерела випромінювання. Для виключення негативного впливу дисперсії у ОВ повинна поширюватися тільки одна мода, тобто хвилеводний параметр $V < 2{,}405$. Це може бути досягнуте збільшенням робочої довжини хвилі, зменшенням діаметра серцевини або зміною різниці показників заломлення (ПЗ) між серцевиною й оболонкою [8].

Зниження ПЗ серцевини дозволяє зменшити кількість симетричних хвиль, що поширюються в ОВ, із чотирьох (ОВ зі східчастим ППЗ, рис. 2, *а*) до двох (ППЗ ОВ відповідає рис. 2, *б*).

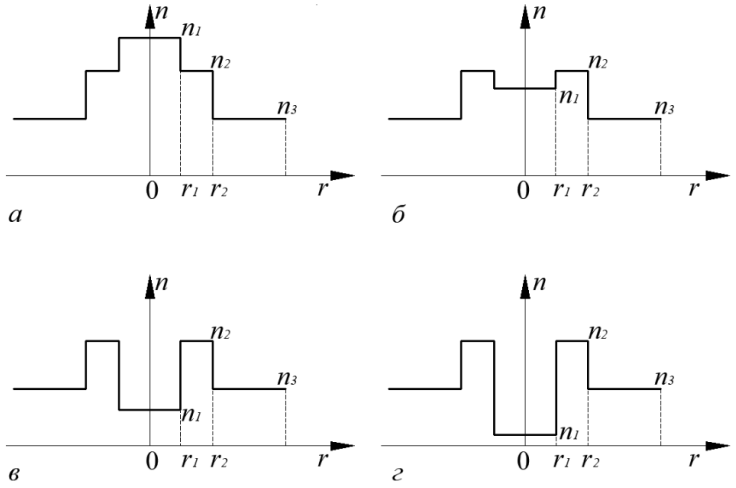


Рисунок 2 – Профілі показника заломлення східчастого ОВ: *а* – стандартний; *б, в* – з депресованою серцевиною; *г* – з повітряним капіляром у серцевині

Подальше зменшення показника заломлення серцевини (рис. 2, *в*) і перехід до волокна з повітряним капіляром у серцевині не змінює картину якісно.

У випадку ППЗ, що відповідає рис. 2, *в-г*, на критичних частотах відбувається витікання хвиль оболонки в зовнішню область, тому що порушується умова повного внутрішнього відбиття на другій границі ("оболонка - навколишнє середовище"). Перехід в зовнішнє середовище починається раніше, чим у внутрішню область.

У випадку, коли профіль ОВ відповідає рис. 2, *б*, умова повного внутрішнього відбиття на границі "серцевина - оболонка" порушується раніше, чим на границі "оболонка - навколишнє середовище". Таким чином, починається перехід хвиль у серцевину ОВ.

Аналіз ППЗ (рис. 2, *в-г*) методом профілів рівного об'єму, показав, що він може бути апроксимований ППЗ, наведеним на рис. 3.

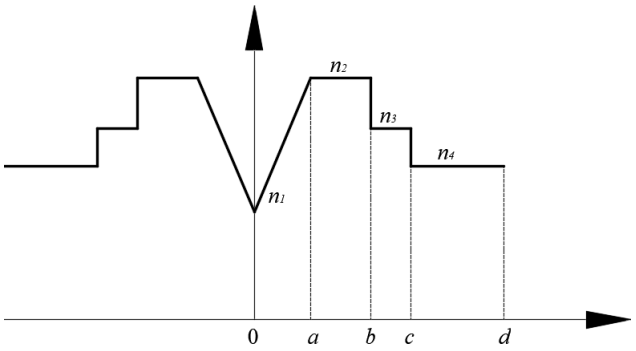


Рисунок 3 – Профіль показника заломлення ОВ "зворотний α-профіль"

У такому профілі конструктивна серцевина має знижений показник заломлення n_1 (область 0 - *a*), робоча серцевина - n_2 (область *a* - *b*), вторинна серцевина - n_3 (область *b* - *c*), а оболонка n_4 (область *c* - *d*). Діаметри трубчастих серцевин визначаються умовою одномодовості при $n_б - n_м = 0{,}002$

$$n\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{n_б^2 - n_м^2}\,(d_б - d_м),$$

де $n_б$,$n_м$ – показники заломлення областей з більшим і меншим ПЗ; $d_б$,$d_м$ – діаметри трубчастих областей.

Другим кроком, спрямованим на підвищення надійності комбінованих кострукційних матеріалів може бути застосування револьверниї оптичних волокон (РОВ) із порожньою серцевиною, відомих як револьверні світловоди (РС). Поперечний переріз структури порожнього РС наведений на рис. 4, де показано геометрію антирезонансного волокна.

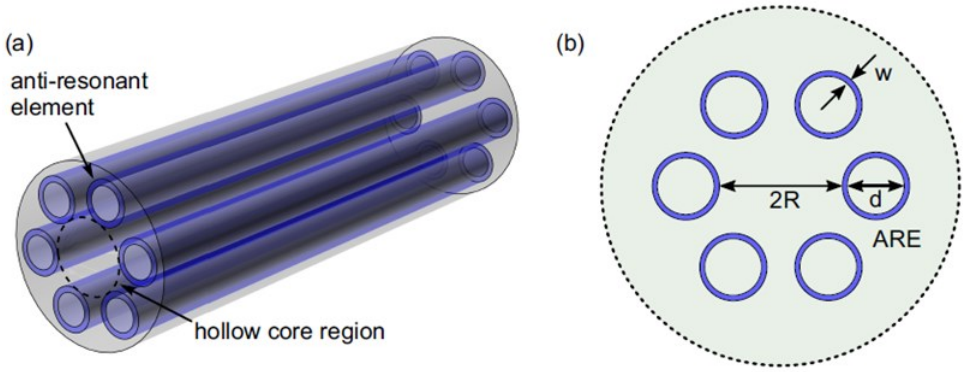


Рисунок 4 – Револьверне оптичне волокно: *а* – геометрія револьверного антирезонансного порожнистого револьверного волокна, де волокно складається з шести антирезонансних елементів кільцевого типу (блакитна область), розташованих навколо центральна область ядра (позначена чорною пунктирною лінією); *б* – поперечний переріз цієї структури з усіма відповідні геометричні параметри. Кільця виготовлені з діелектричного матеріалу, тоді як середовище з нижчим показником заломлення знаходиться в іншому місці.

Його конструкція включає шість елементів кільцевої форми, розташованих навколо центральної області ядра, яке оточене середовищем із нижчим показником заломлення. Кільця виконані з діелектричного матеріалу. Висока локалізація випромінювання у порожній серцевині стала реальною завдяки специфічній конструкції РОВ із негативною кривизною межі серцевина-оболонка. Такий підхід забезпечив мінімальну частку оптичної потужності в оболонці – менш ніж 10^{-5}. На сьогоднішній день досягнуті мінімальні оптичні втрати у кварцових РОВ складають 0,22 дБ/км для довжини хвилі 1625 нм та 0,28 дБ/км для 1550 нм. Це наближається до показників традиційних телекомунікаційних світловодів (~0,15 дБ/км при λ = 1550 нм). Завдяки порожній серцевині такі механізми оптичних втрат, як релєєвське розсіювання чи електронне та фононне поглинання, значно подавлені. Значення РОВ продовжує зростати через їх здатність до подальшого зниження оптичних втрат, що відкриває перспективи для нових поколінь волоконно-оптичних систем зв'язку. Вперше саме у порожніх РОВ було впроваджено концепцію негативної кривизни оболонки. Ця властивість дозволяє знизити оптичні втрати за рахунок відбиття випромінювання на межі серцевина-оболонка та унікальної геометрії поперечного перерізу. Відмінною рисою РОВ є циліндрична симетрія елементів оболонки та їх розташування навколо серцевини без зіткнення. Таке рішення не лише покращує хвилеводні характеристики, але й сприяє стабільності параметрів вздовж усієї довжини світловода. Матеріал виготовлення, геометричні властивості, а також точність їх підтримки прямо впливають на оптичні якості РОВ. Порівняно з іншими ОВ з порожниною, РОВ характеризуються простотою конструкції. Виконані з кварцового скла, вони здатні передавати випромінювання у спектрі від вакуумного ультрафіолету до середнього інфрачервоного діапазону. Дослідження довели, що оптичні втрати в РОВ не перевищують 1 дБ/м у діапазоні від 200 нм до 4,4 мкм. У близькому спектрі ІЧ порожнисті фотонно-кристалічні світловоди (ФКС) демонструють трохи нижчі втрати (близько 1 дБ/км на 1,5 мкм). Проте через взаємодію з декількома періодами фотонного кристала вони більш чутливі до втрат у широкому спектрі, на відміну від РОВ [9 - 14].

Унікальні можливості РОВ дозволяють значно збільшити кількість вимірювальних приладів, які можуть інтегровані до складу композитних конструкційних матеріалів [15, 16].

Таким чином, використання інтегрованих РОВ наблизить вирішення завдання створення сенсорних поверхонь, здатних відтворювати розподіл фізичних полів на корпус судна.

Поліпшення характеристик РОВ має перспективи завдяки використанню альтернативних скломатеріалів. Об’єднання отриманих даних із результатами вимірювань інших волоконно-оптичних датчиків, що здійснюють контроль за гідрометеорологічними умовами, в єдиній інформаційно-вимірювальній системі значно підвищить енергоефективність роботи суден [17, 18].

ЛІТЕРАТУРА

1. Ramakrishnan, M., Rajan, G., Semenova, Y., & Farrell, G. (2016). Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. Sensors, 16(1), 99.

2. Ye, X. W.; Su, Y. H.; Han, J. P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. The Sci. World J. 2014.

3. Lee, D. C.; Lee, J. J.; Yun, S. J. The mechanical characteristics of smart composite structures with embedded optical fiber sensors. Compos. Struct. 1995, 32, pp. 39 - 50.

4. Güemes, J., Perez, J. S. Fiber Optics Sensors. In New Trends in Structural Health Monitoring; Springer: Vienna, Austria, 2013; pp. 265 - 316.

5. Luycks, G., Voet, E., Lammens, N., Degrieck, J. Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research. Sensors 2011, 11, 384 - 408.

6. Błażejewski, W., Gąsior, P., Kaleta, J. Application of Optical Fiber Sensors to Measuring the Mechanical Properties of Composite Materials and Structures. In Advances in Composite Materials. Ecodesign and Analysis; InTech: Rijeka, Croatia, 2011.

7. Emmanwori, L., Shivakumar, K. N. Structural performance of composite laminates with embedded fiber optic sensor under tension and compression loads. In Proceedings of the 43rd Annual Conference of American Institute of Aeronautics and Astronautics, Denver, CO, USA, 22 -5 April 2002.

8. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

9. Опришко, М. О., Карпілов, О. Ю., Сандлер, А. К., Філін, В. М. Застосування новітніх матеріалів для створення елементів комбінованих електроенергетичних установок з вітрорушієм // XII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 21.11.2022 - 23.11.2022 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2022. – С. 169 - 173. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

10.Опришко, М. О. Застосування нанотехнологій в суднобудуванні // Суднові енергетичні установки. – 2020. – № 40. – С. 134 - 138.

11.Опришко, М. О. Конструкційні, інструментальні й триботехнічні наноматеріали // Матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт". – Одеса: НУ"ОМА". – 2021. – С. 72 - 76.

12.Сандлер, А. К. Новітні технології та традиційні матеріали – чи можливе поєднання? // Наукові проблеми архітектури та містобудування. – 2025. – Вип. 3. – С. 264 - 273. DOI:10.31650/2786-7749-2025-3-264-273.

13.Sandler, A. K. Fiber-optical equipment for technical diagnostics of high-rise architectural structures // Наукові проблеми архітектури та містобудування. – 2025. – Вип. 3. – С. 274 - 288. DOI:10.31650/2786-7749-2025-3-274-288.

14.Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю. Застосування новітніх типів оптичного волокна у навігаційних підводних безпілотних апаратах // Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2025. – С. 214 - 221. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.

15.Сандлер, А. К., Опришко, М. О. Волоконно-оптичний датчик моніторингу стану гідротехнічних споруд // Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали V Міжнародної наукової конференції, м. Київ, 24 лютого, 2023 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: Європейська наукова платформа, 2023. – С. 166 - 171. DOI: 10.36074/mcnd-24.02.2023.

16.Сандлер, А. К., Опришко, М. О. Пристрій для автоматизованного контролю складових сонячного випромінювання // Automation of Technological and Business Processes. – 2024. – № 16 (4). – P. 32 - 37. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v16i4.2949.

17.Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Волоконно-оптический инвариантный гидрофон // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – 2016. – Вип. 271. – Т. 283. Комп'ютерні технології. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – С. 16 - 20.

18.Бурнашов, В. В. Волоконно-оптичні системи моніторингу гідродинамічного навантаження у завданнях навігації морських суден // Modern science and innovation: trends, challenges, and breakthroughs: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the I International Scientific and Theoretical Conference, May 23, 2025. New York, USA: International Center of Scientific Research. – P. 204 - 211. DOI 10.36074/scientia-23.05.2025.

GaN і SiC: НОВІ МАТЕРІАЛИ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

[1] **Шестака А. І.,** ст. викладач
https://orcid.org/0000-0003-3229-0922
[2] **Мельнікова Л.М.**, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-6218-4090
[1]Національний університет "Одеська морська академія"
[2]Національний університет "Одеська Політехніка"

Анотація: *розглянуто нові можливості сучасних напівпровідникових матеріалів, а також їх застосування в прикладних задачах силової електроніки.*

Ключові слова*: кремній, нітрид галію, карбід кремнію, зарядні пристрої, DC-DC перетворювачі, інвертори, RF-електроніка, енергозбереження.*

GaN and SiC: NEW MATERIALS AND NEW OPPORTUNITIES FOR POWER ELECTRONICS

[1]**Shestaka A.,** Senior lecturer
https://orcid.org/0000-0003-3229-0922
[2]**Melnikova L.,** Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-6218-4090
[1]National University "Odessa Maritime Academy"
[2]Odesa Polytechnic National University

Abstract: *new possibilities of modern semiconductor materials, as well as their application in applied problems of power electronics, are considered.*

Key-words: *silicon, gallium nitride, silicon carbide, chargers, DC-DC converters, inverters, RF electronics, energy saving.*

Силова електроніка є невід'ємним елементом сучасних інженерних задач в галузі ефективно перетворення та керування електричною енергією — від невеликих зарядних пристроїв до систем керування електротранспортом і промислових енергосистем. Протягом останніх чотирьох десятиліть минулого сторіччя технічні рішення цій галузі базувалися на основі кремнію (Si). Однак, близько двадцяти років тому почали з'являтись нові технології, що призвели до нових технічних рішень з використанням напівпровідників з широкою забороненою зоною (Wide-Bandgap, WBG) — зокрема, нітриду галію (GaN) та карбіду кремнію (SiC), які розпочали справжню революцію, обіцяючи небачені раніше показники ефективності та компактності пристроїв силової електроніки.

Si фактично досяг своїх технологічних і теоретичних меж у високопродуктивних застосуваннях: із збільшенням робочої частоти та напруги кремнієві транзистори, такі як IGBT та MOSFET, не можуть позбутися значних втрат енергії на перемикання та втрат на провідність, що вимагає використання громіздких радіаторів і вентиляторів. Це автоматично підвищує габарити та масу пристроїв силової електроніки, а також робить їх вельми вимогливими до умов роботи.

Натомість, GaN та SiC вирішують цю проблему завдяки своїм унікальним фізичним властивостям:

1) Широка заборонена зона, значно більша, ніж у Si (1.12 еВ). У SiC вона становить приблизно 3.2 еВ, а в GaN приблизно 3.4 еВ. Це дозволяє матеріалам працювати за вищої температури і вищої напруги без термічного руйнування;

2) Вища критична напруженість електричного поля, що дозволяє створювати пристрої з тоншими шарами для витримки тієї ж напруги, що призводить до меншого опору в увімкненому стані та менших втрат на провідність;

3)Висока рухливість електронів (особливо в GaN) забезпечує надзвичайно високі швидкості перемикання, тобто вищі робочі частоти.

GaN є ідеальним матеріалом для застосувань із високою частотою перемикання та середньою (до 650 В) напругою, оскільки він забезпечує найнижчі втрати на перемикання. Його ключові особливості:

- надзвичайна швидкість, оскільки висока рухливість електронів дозволяє GaN-транзисторам (зазвичай HEMTs — High Electron Mobility Transistors) працювати на частотах у десятки мегагерц;

- інтеграція на кремнії: GaN-транзистори часто вирощують на недорогих кремнієвих підкладках (GaN-on-Si), що значно знижує виробничу вартість порівняно з SiC;

Приклади застосування: зарядні пристрої для споживчої електроніки (телефони, ноутбуки, тощо), DC-DC перетворювачі, інвертори для сонячної енергетики та, що особливо важливо, RF-електроніка (5G та радарні системи).

Перехід до високих частот дозволяє використовувати значно менші індуктори, конденсатори та трансформатори, що радикально зменшує розмір та вагу кінцевого продукту.

SiC є основним конкурент кремнію в застосуваннях із високою потужністю та високою напругою (від 1200 В до 10 кВ). Його переваги:

- висока напруга пробою: завдяки широкій забороненій зоні SiC-пристрої легко витримують напругу, недосяжну для Si;

- теплостійкість: SiC може працювати при температурах понад 200 С, тоді як Si-пристрої обмежені 150 С. Це дозволяє значно зменшити або повністю виключити активне охолодження.

Приклади застосування: тягові інвертори для електромобілів, де SiC збільшує запас ходу та зменшує розмір інвертора; високовольтні системи передачі потужності; інвертори для вітроенергетики та залізничного транспорту.

SiC вже став стандартом де-факто у головних інверторах багатьох провідних виробників електромобілів, демонструючи збільшення ефективності батареї до 10%.

Треба зазначити, що нітрид галію перейшов з ніші в мейнстрім лише за кілька років. Раніше обмежений застосуваннями, як швидкі зарядні пристрої, GaN тепер живить центри обробки даних, сонячні інвертори та системи силові агрегати електромобілів. Впровадження GaN швидко прискорилося — ринок силових пристроїв GaN зріс майже в дев'ять разів між 2020 і 2025 роками, демонструючи, що це перевірений вибір для вимогливих застосувань.

Динаміка зростання частки нових напівпровідників в короткій ретроспективі (від 2022 року) і з прогнозами до 2030 року згідно досліджень Yole Grop [1] наведена на рис. 1.

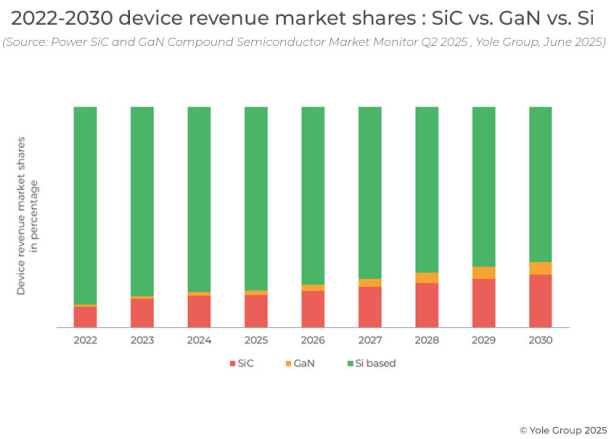


Рисунок 1 - Частки ринку дохідності від продажу пристроїв у 2022-2030 роках – за матеріалами досліджень Yole Group

Причина зростання популярності GaN проста: високе поле пробою GaN та швидка рухливість електронів призводять до менших пристроїв з дуже низьким зарядом паразитних ємностей, і це дозволяє швидке перемикання з низькими втратами без зворотного відновлення неосновних носіїв. Розробники можуть значно підвищити частоти комутації, щоб зменшити магнітні елементи та конденсатори, що призводить до підвищення ефективності та щільності потужності, зрештою створюючи менші продукти, які споживають менше енергії.

В цей же час, карбід кремнію став справжнім каталізатором стрімкого розвитку галузі електромобілів завдяки своїй здатності працювати при високій напрузі та потужності, що є критичним для сучасних систем автомобільного електроприводу. Тяговий інвертор електромобіля перетворює постійний струм від акумулятора на змінний струм для живлення електродвигуна і при цьому є єдиним найбільшим джерелом втрат потужності між батареєю та колесами.

Тому перехід від кремнієвих IGBT до SiC MOSFETs зменшує втрати енергії в інверторі на 50-70%, що підтверджено такими провідними галузевими виробниками як Wolfspeed та Infineon. Це зменшення втрат безпосередньо трансформується у збільшення запасу ходу автомобіля, зазвичай на 5-10%, при тому ж розмірі батареї.

Сучасні виробники електрокарів переходять на високовольтні архітектури (наприклад, 800 В замість 400 В) для прискореної зарядки та зменшення втрат. SiC MOSFETs легко витримують такі напруги (1200 В), тоді як кремнієві пристрої цього класу є громіздкими та менш ефективними. До того ж, ефективне перемикання SiC дозволяє суттєво зменшити розмір інвертора та його системи охолодження, звільняючи місце та зменшуючи загальну вагу автомобіля.

Таким чином, в сучасному ландшафті силових напівпровідників кожен матеріал має своє місце:

- Si залишається економічно ефективним при нижчих напругах та помірних частотах;
- SiC домінує в найвищих діапазонах напруги та потужності;
- GaN, особливо в класі від 600 В до 650 В, є оптимальною технологією, коли потрібні надшвидке перемикання, компактний розмір та високоефективні властивості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Power SiC/GaN Compound Semiconductor Market Monitor - https://www.yolegroup.com/product/quarterly-monitor/power-sicgan-compound-semiconductor-market-monitor/

2. Jeff Shepard - How to Use Integrated GaN Switches for High Efficiency, Cost-Effective Offline Power Supplies - https://www.digikey.com/en/articles/how-to-use-integrated-gan-switches-for-offline-power-supplies?gad_source=7&dclid=CI6ctOi1j5EDFcUCdQEd1L81wA

3. Anup Bhalla - Are you SiC of Silicon? - https://www.powersystemsdesign.com/

4. Si, SiC and GaN for Power Devices - https://www.engineering.com/si-sic-and-gan-for-power-devices-part-two-igbts-si-mosfets-super-junction-si-mosfets-and-sic-mosfets/

5. Masoud Beheshti - The Power to Do Even More with GaN – https://www.ti.com/lit/ta/ssztab2/ssztab2.pdf?ts=1763192553333

Секція 5. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І ЯВИЩ В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ В ТІЛАХ, ЩО МІСТЯТЬ ТОНКІ ЖОРСТКІ ВКЛЮЧЕННЯ

Всеволод Попов, д.ф.-м.н, професор
https://orcid.org/0000-0003-2416-642X
Ольга Кирилова, к.ф.-м.н, доцент
https://orcid.org/0000-0002-9221-182X
Національний університет «Одеська морська академія», Україна

Пропонується математична модель хвильових полів в пружних тілах, що знаходяться під дією вібрації і містять довільні системи тонких жорстких включень. Внаслідок вібрації в тілі поширюються плоскі гармонічні P і SV хвилі, що взаємодіють з включеннями. Математична модель формулюється у вигляді граничної задачі для рівняння руху пружного середовища в умовах плоскої деформації, яка приводиться до системи інтегральних рівнянь відносно стрибків напружень на поверхнях включень. Отримана система розв'язується наближено методом механічних квадратур. Спроможність моделі досліджувати особливості хвильових полів, утворених дифракцією хвиль на включеннях демонструється числовими прикладами.

Ключові слова: *тонкі включення, пружні хвилі, інтегральні рівняння, коефіцієнти інтенсивності напружень*

MATHEMATICAL MODELING OF WAVE FIELDS IN BODIES CONTAINING THIN RIGID INCLUSIONS

Vsevolod Popov, Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0003-2416-642X
Olha Kyrylova, Ph.D, associated professor
https://orcid.org/0000-0002-9221-182X
National University «Odessa Maritime Academy»

A mathematical model of wave fields in elastic bodies subjected to vibration and containing arbitrary systems of thin rigid inclusions is proposed. As a result of vibration, plane harmonic P and SV waves propagate in the body, interacting with the inclusions. The mathematical model is formulated as a boundary value problem for the equation of motion of an elastic medium under conditions of plane deformation, which is reduced to a system of integral equations with respect to the stress jumps on the surfaces of the inclusions. The resulting system is solved approximately by the method of mechanical quadratures. The ability of the model to investigate the features of wave fields formed by the diffraction of waves on the inclusions is demonstrated by numerical examples.

Keywords: thin inclusions, elastic waves, integral equations, stress intensity factors

Присутність в деталях енергетичних установок, суднових конструкцій, портових споруд неоднорідностей у вигляді тонких включень великої жорсткості [1-3] є досить поширеною ситуацією. Це можуть бути як технологічні дефекти, так і підкріплюючі елементи великої жорсткості. При створенні сучасних композитних матеріалів також використовуються жорсткі вставки у вигляді тонких включень. Ці жорсткі підкріплення з одного боку підсилюють загальну міцність деталей, а з іншого є джерелом концентрації напружень в їх околі , що може призвести до появи тріщин та руйнування [1,2]. Особливо це стає актуальним в умовах вібрації, оскільки складна структура хвильових полів, утворених відбиттям хвиль від поверхонь включень, може суттєво підвищувати інтенсивність напружень і спричиняти явища, подібні до резонансу [4,5]. Як можна бачити з огляду сучасної літератури, зокрема з детального огляду [1], існує різноманіття наукових робіт, де

розглядаються тіла з одним окремим включенням. Робіт, де здійснюється моделювання хвильових полів в тілах з системами включень, значно менше.

В даній роботі формулюється і розв'язується задача математичного моделювання хвильових полів, що виникають внаслідок взаємодії хвиль з системами довільно розміщених включень.

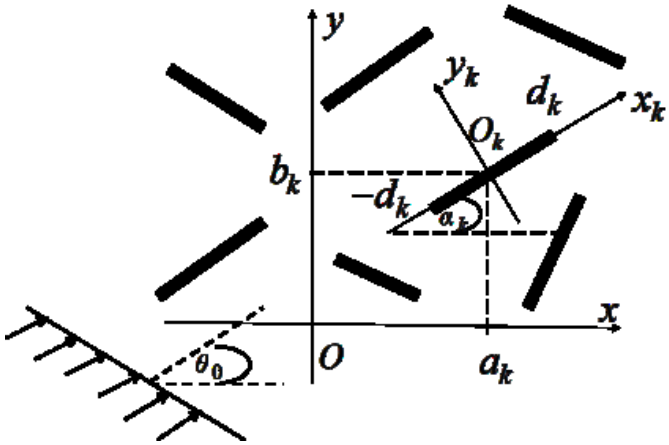


Рис.1

1. Постановка задачі і приведення її до систем інтегральних рівнянь.

Розглядається пружне ізотропне тіло, що знаходиться у стані плоскої деформації та містить N тонких жорстких включень. Включення в координатній площині Oxy розміщуються на відрізках довжиною $2d_k$ з центрами у точках $O_k(a_k,b_k), k=1,2,...N$ і мають товщину $s_k << h_k$ (Рис. 1). У тілі поширюються і взаємодіють з включеннями плоскі гармонічні хвилі, поздовжні P або зсувні SV, які викликають переміщення $u_0(x,y), v_0(x,y)$. Залежність від часу визначається множником $e^{-i\omega t}$, який всюди відкинуто.

Нехай $u(x,y), v(x,y)$ – переміщення розсіяного включеннями хвильового поля. За умов плоскої деформації вони мають задовольняти рівняння руху:

$$(\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\mu\Delta u=-\rho\omega^2 u;\quad (\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\mu\Delta v=-\rho\omega^2 v, \qquad (1)$$

де λ,μ,ρ – коефіцієнти Ламе і густина пружного середовища, ω – частота коливань.

Систему рівнянь (1) слід доповнити граничними умовами на включеннях, які внаслідок малої товщини формулюються на їх серединній поверхні. Для цього з кожним включенням пов'язується локальна система координат $O_k x_k y_k$ (Рис.1). Нехай $u^k(x_k,y_k), v^k(x_k,y_k)$, $\sigma_x^k(x_k,y_k), \sigma_y^k(x_k,y_k)$, $\tau_{yx}^k(x_k,y_k)$ – переміщення і напруження розсіяного хвильового поля у системі координат, пов'язаній з *k*-м включенням, а $u^{0k}(x_k,y_k), v^{0k}(x_k,y_k)$ – переміщення хвиль, що діють на включення у тій же системі координат. Тоді, за умов повного зчеплення включень з матрицею, мають виконуватись рівності:

$$v^k(x_k,0)=h_{1k}+\beta_k x_k-v^{0k}(x_k,0);\ u^k(x_k,0)=h_{2k}-u^{0k}(x_k,0),\ -d_k<x_k<d_k, k=1,2,...,N. \qquad (2)$$

Окрім того, наявність включень спричиняє розриви напружень, стрибки яких позначено

$$\sigma_y^k(x_k,+0)-\sigma_y^k(x_k,-0)=\chi_{1k}(y);\tau_{yx}^k(x_k,+0)-\tau_{yx}^k(x_k,-0)=\chi_{2k}(y);-d_k<x<d_k;k=1,2,...N. \quad (3)$$

Невідомі амплітуди коливань включення, що входять у (2), визначаються з рівнянь руху [5]. За сформульованих умов необхідно визначити поле напружень у тілі з системою включень. Для цього, як і у [5], використовуємо розривні розв'язки рівнянь (1) зі стрибками напружень (3) $v^{dl}(x_l,y_l), u^{dl}(x_l,y_l)$, побудовані для кожного включення у пов'язаній з ним системі координат.

У системі Oxy кожен розривний розв'язок визначає наступні переміщення: $u^{gl}=u^{dl}\cos\alpha_l - v^{dl}\sin\alpha_l$; $v^{gl}=u^{dl}\sin\alpha_l + v^{dl}\cos\alpha_l$, α_l – кути між осями Ox_l та Ox.

Переміщення, спричинені хвилями, відбитими від включень, подамо так:

$$u(x,y)=\sum_{l=1}^{N}u^{gl}(x,y),\quad v(x,y)=\sum_{l=1}^{N}v^{gl}(x,y) \tag{4}$$

У подібному вигляді подаються і напруження $\sigma_x,\sigma_y,\tau_{xy}$. Таким чином, формули (4) дозволяють знаходити переміщення і напруження в тілі з включеннями за умови того, що визначені невідомі стрибки (3). Для цього в результаті реалізації умов (2), отримана система $2N$ інтегральних рівнянь відносно невідомих стрибків напружень.

2. Числове розв'язання та аналіз результатів. Для наближеного розв'язання системи застосовано метод, детально викладений у [7]. Він полягає у поданні невідомої функції з врахуванням кореневої особливості напружень в околі включень у вигляді

$$\varphi_{sk}(\tau)=\mu^{-1}\chi_{sk}(d_k\tau);\ \varphi_{sk}(\tau)=\left(1-\tau^2\right)^{-0,5}\psi_{sk}(\tau),\ \ k=1,2,...,N;\ \ s=1,2, \tag{5}$$

де функції $\psi_{sk}(\tau)$ вважаються такими, що задовольняють умови Гельдера і $\psi_{sk}(\pm1)\neq0$. Далі здійснюється наближення цих функцій інтерполяційним многочленом, де вузлами інтерполяції є $\tau_m, m=1,2,...,n$ – корені многочлена Чебишева $T_n(\tau)$. Для визначення значень ψ_{skm} невідомих функцій в вузлах інтерполяції так само, як у [7], методом механічних квадратур отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь.

Важливою характеристикою хвильового поля напружень в околі тонких включень є коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) [1], [3]. Після числового розв'язання системи через подання (5) їх безрозмірні значення знаходяться за формулами [7]:

$$k_{sl}^{\pm}=\pm\frac{(-1)^s}{16(1-\nu)}\psi_{sl}(\pm1),\ s=1,2;\ l=1,2,...,N. \tag{6}$$

В (6) $k_{1l}^{\pm}$, $k_{2l}^{\pm}$ коефіцієнти інтенсивності нормальних та дотичних напружень.

На прикладі системи восьми включень однакової довжини (Рис. 2) здійснена реалізація запропонованої математичної моделі. Взаємне розміщення включень визначається параметрами $h/d=0,25$ і кутом β, величина якого змінюється. Включення припускаються сталевими, а матеріалом зовнішнього середовища є оргскло.

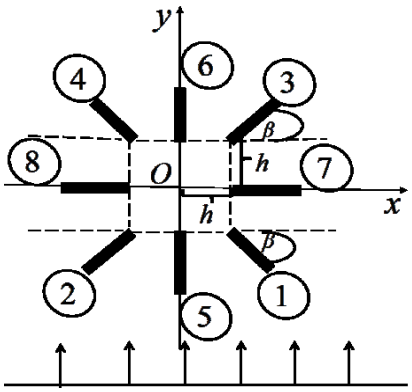


Рис.2

Система включень знаходиться під дією повздовжніх P – хвиль одиничної безрозмірної амплітуди $A/d=1$. Хвилі поширюються вздовж осі Oy (Рис. 2), тобто $\theta_0=90^0$. Результати розрахунку КІН нормальних напружень k_{11}^- для першого включення наведено у вигляді графіків залежності КІН від безрозмірного хвильового числа.

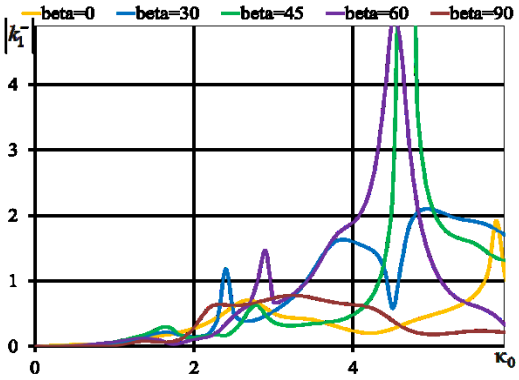


Рис.3

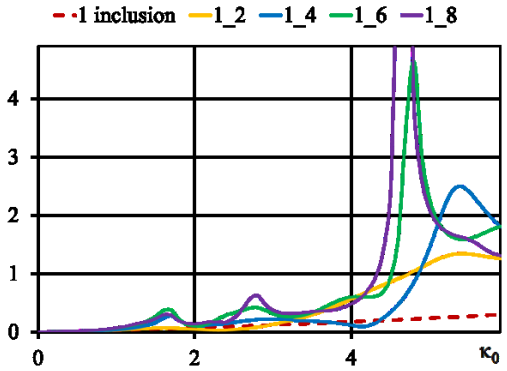


Рис. 4

Графіки на Рис. 3 показують вплив на інтенсивність напружень конфігурації системи, а саме кута β. Як можна бачити, для кожного значення кута існують частоти, при яких значення КІН сягають максимуму. Найбільший з них спостерігається при $\beta=45^0$. Графіки на рис.4 показують вплив кількості взаємодіючих включень на інтенсивність напружень і їх околі. Розглядались випадки двох (1 і 2), чотирьох (1-4), шести (1-6) та восьми включень при значенні $\beta=45^0$. Штрихова крива показує зміну значень КІН для одного першого включення. Результати розрахунків демонструють, що взаємодія між включеннями в умовах вібрації приводить до зростання інтенсивності напружень в порівнянні з одним окремим включенням. Починаючи з деякого моменту (у даному випадку $N\geq 4$) виникають частоти, при яких спостерігаються явища, подібні до резонансу. При цих частотах значення КІН можуть у десятки разів перевищувати значення для одного окремого включення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Під заг. ред.. Кушніра Р.М. Руйнування пружних тіл із включеннями та його діагностування. Теоретичні основи динамічних процесів у пружних тілах з включеннями. Т.1.Львів: НАН України, ІППММ ім. Я.С. Підстригача (2023).-280 с.

2. Під заг. ред.. Кушніра Р.М. Руйнування пружних тіл із включеннями та його діагностування. Акустико-емісійне діагностування руйнування включень. Т.2. Львів: НАН України, ІППММ ім. Я.С. Підстригача (2023).-402 с.

3. Sulym, H.T. Foundations of the Mathematical theory of thermoelastic equilibrium of deformed bodies with thin inclusions [in Ukrainian]. Doslidno-Vydavnychyi Tsentr NTSh, Lviv (2007)

4 Popov V. G. An Iterative Method for Solving the Problem of Diffraction of Longitudinal Shear Waves on A System of Thin Rigid Inclusions // Mech. Eng. – 2021. –**3**. (4). EME.000568. DOI: 10.31031/EME.2021.03.000568

5. Попов В. Г., Кирилова О. І. Ітераційний метод визначення двовимірного динамічного напруженого стану при наявності в пружному тілі системи тонких жорстких включень // Мат.мет. та фіз.- мех.поля – 2024. – 67, No. 1-2. – С. 207–216, https://doi.org/10.15407/mmpmf2024.67

6. Popov V.G., Ulanovskii A.E. Comparative study of diffraction fields generated by elastic waves passing through imperfections of various nature // Mech. of Solids. – 1995. –30, № 4. – P. 93-102.

7. Lytvyn O.V., Popov V.H. Interaction of plane harmonic waves with inclusions in the elastic space // Mater. Sci. – 2007. – 43, No. 3. – P. 361–369, https://doi.org/10.1007/s11003-007-0041-0

КІНЕЧНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ В ДІАПАЗОНІ УЛЬТРАВИСОКИХ ЧАСТОТ

Пташенко Ф.О., д.ф.-м.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-8203-0494
Поповський О.Ю., к.ф.-м.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-0928-4452
Горюк А.А., к.ф.-м.н., доцент
Зенченко В.П., к.ф.-м.н., доцент
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *У роботі представлено кінечно-елементне моделювання бездротової передачі енергії в УВЧ-діапазоні між двома рамковими антенами, оснащеними підстроювальними індуктивностями. Досліджено вплив відстані між антенами та величини індуктивності на коефіцієнт передачі потужності. Показано, що при індуктивностях 50-56 нГн і відстані близько 2 см досягається максимальна ефективність передачі – до 60% від потужності, що підводиться. Отримані результати підтверджують можливість оптимізації параметрів друкованих антен ближньої дії для RFID- та WPT-систем, а також демонструють застосування чисельного моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics для аналізу електромагнітного зв'язку антен.*

Ключові слова: *кінечно-елементне моделювання, бездротова передача енергії, ультрависокі частоти (УВЧ, UHF), S-параметри, COMSOL Multiphysics.*

FINITE ELEMENT MODELING OF WIRELESS POWER TRANSMISSION IN THE ULTRA-HIGH FREQUENCY RANGE

Ptashchenko F.O., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-8203-0494
Popovsky O.Yu., Cand. of Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-0928-4452
Goryuk A.A., Cand. of Sciences, Associate Professor
Zenchenko V.P., Cand. of Sciences
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *The paper presents a finite element simulation of wireless power transfer in the UHF band between two loop antennas equipped with tuning inductors. The influence of the distance between the antennas and the inductance value on the reflection and transmission coefficients is analyzed. It is shown that at inductances of 50–56 nH and a spacing of about 2 cm, the maximum transfer efficiency reaches up to 60% of the input power. The obtained results confirm the possibility of optimizing the parameters of short-range printed antennas for RFID and WPT systems and demonstrate the applicability of numerical modeling in* ***COMSOL Multiphysics*** *for analyzing electromagnetic coupling of antennas in the UHF frequency range.*

Keywords: *finite element modeling, wireless power transfer, S-parameters,COMSOL Multiphysics.*

Сучасні технології бездротової передачі енергії (Wireless Power Transfer, WPT) знаходять широке застосування в системах радіочастотної ідентифікації (RFID), бездротових датчиках та малопотужних пристроях Інтернету речей (IoT). Найбільш активно використовуються діапазони низьких та середніх частот (до кількох мегагерц), де передача енергії здійснюється переважно за рахунок індуктивного зв'язку котушок. Однак підвищення частоти до діапазону ультрависоких частот (UHF, 860-960 МГц) відкриває нові можливості: зменшення розмірів антен, поєднання функцій передачі енергії та радіозв'язку, а також реалізація гібридних систем RFID-типу. В UHF-діапазоні взаємодія між антенами носить перехідний характер між ближнім індуктивним та далеким електромагнітним полем. Ефективність передачі енергії при цьому істотно залежить від взаємного розташування антен,

їхньої геометрії, орієнтації та узгодження резонансних контурів. Зміна цих параметрів призводить до зсуву резонансних частот, перерозподілу щільності електромагнітного поля та зміни коефіцієнтів зв'язку. Метод кінечних елементів, реалізований у програмному середовищі COMSOL Multiphysics, дозволяє детально проаналізувати розподіл електромагнітних полів, S-параметри та енергетичні потоки в системах бездротової передачі енергії. Моделювання в частотній області забезпечує отримання комплексних S-параметрів (S_{11}, S_{21}), що характеризують відбиту та передану потужність, а також дозволяє оцінити вплив геометричних та електричних параметрів на ефективність передачі. У цій роботі розглядається модель передачі енергії в UHF-діапазоні між двома кільцевими рамковими антенами. Як робоча частота вибрано значення 868 МГц, що відповідає діапазону UHF RFID, дозволеному для промислового, наукового та медичного застосування (ISM band) в Європі. Цей діапазон широко використовується в системах радіочастотної ідентифікації та бездротової передачі енергії малої потужності. Частота 868 МГц забезпечує оптимальне поєднання дальності зв'язку та розмірів антен, дозволяючи реалізувати компактні конструкції із стійкими характеристиками електромагнітного зв'язку. Був досліджений вплив відстані між антенами та величини підстроювальної індуктивності на коефіцієнти відбиття та передачі потужності. Отримані залежності дозволяють виявити оптимальні комбінації параметрів, що забезпечують максимальну ефективність передачі енергії в ближньому діапазоні і перехідного електромагнітного поля. Подібні підходи до чисельного аналізу бездротової передачі енергії докладно розглянуті у роботах [1–3], результати яких підтверджують актуальність дослідження таких систем на частотах UHF RFID.

У якості об'єкта дослідження було обрано систему двох ідентичних рамкових антен, виконаних у вигляді тонких мідних кілець, нанесених на підкладку з політетрафторетилену (PTFE) товщиною 2 мм. Товщина мідного шару в моделі вважалася дуже малою в порівнянні з радіусом кривизни, але вона значно перевищує глибину скін-шару міді (≈2.15 мкм при частоті 868 МГц), що дозволяє описувати провідний шар граничною умовою ідеального провідника (Perfect Electric Conductor, PEC). У центрі кожного кільця встановлена зосереджена індуктивність, що моделює стандартний елемент поверхневого монтажу форм-фактору 0805. Використання подібних компонентів робить конструкцію антени технологічною та сумісною з типовими друкованими платами, що спрощує практичну реалізацію. Номінали індуктивностей варіювалися в діапазоні 42-60 нГн для забезпечення резонансного налаштування системи на частоту 868 МГц. У розриві кожного кільця, виконаного як PEC-контур, розміщений зосереджений порт з хвильовим опором 50 Ом, який використовується для збудження передавальної антени або вимірювання відгуку приймальної. Діаметр кожного кільця становить 4 см, ширина провідної доріжки – 3 мм. Відстань між антенами змінювалася параметрично від 1 до 20 см, що дозволило дослідити вплив коефіцієнта зв'язку на частотні характеристики системи. Розрахункова область являє собоюсферу, яка оточує обидві антени. Зовнішня межа цієї сфери включала ідеально узгоджені шари (Perfectly Matched Layers, PML), які забезпечували поглинання випромінювання від передавальної антени та моделювання умов вільного простору без відбиття. Чисельне моделювання було проведене у програмному середовищі COMSOL Multiphysics, модуль RF > Electromagnetic Waves, Frequency Domain. Була використана стаціонарна частотна постановка задачі з комплексними S-параметрами (S_{11}, S_{21}), що характеризують відбиту та передану потужність. Сітка формувалася адаптивно з локальним згущенням в областях високої градієнтності поля (поблизу антен та портів). Для аналізу було виконано два типи розрахунків: frequency sweep (в діапазоні частот 100–1000 МГц) та parametric sweep по відстані між антенами при фіксованій частоті 868 МГц.

На рис. 1*а* представлена розрахункова геометрія моделі, що включає дві ідентичні рамкові антени, розташовані на PTFE підкладках і оточені сферичною областю з ідеально узгодженими шарами (PML). Відображена кінечно-елементна сітка характеризується згущенням в областях високого градієнта електромагнітного поля поблизу антен і портів

збудження. Така конфігурація забезпечує точне опис як ближнього поля, так і перехідної області, у якій відбувається електромагнітне взаємодія антен.

На рис. 1*б* показано розподіл модуля середнього електричного поля (в логарифмічному масштабі) і векторів середнього потоку енергії при збудженні передавальної антени на частоті 868 МГц. Видно, що основна частина потоку енергії зосереджена в ділянці між антенами, де формується замкнута система силових ліній. При збільшенні відстані між антенами інтенсивність поля області зв'язку зменшується, що відбиває експоненціальне ослаблення магнітної та електричної компонент у ближній зоні. Наявність спрямованого потоку енергії від передавальної антени до приймальної підтверджує коректність постановки граничних умов та обраної частоти збудження.

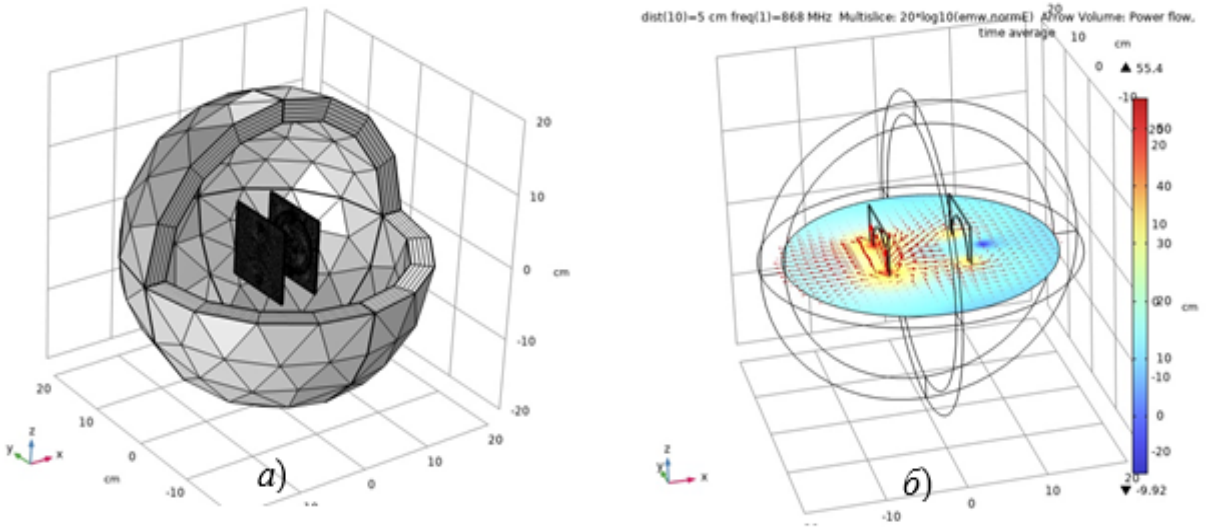


Рисунок 1 – *а*) зовнішній вигляд модельної області з розбиттям на кінечно-елементну сітку; *б*) розподіл модуля середнього електричного поля в логарифмічному масштабі, стрілками показано напрямки векторів середнього потоку енергії.

Основні кількісні результати аналізу представлені рис. 2, де показано залежність коефіцієнта передачі потужності $|S_{21}|^2$ від відстані між антенами d при різних значеннях підстроювальної індуктивності L. Для всіх досліджених значень L спостерігається наявність чітко вираженого максимуму поблизу $d \approx 2$ см, що відповідає оптимальному співвідношенню коефіцієнта зв'язку та параметрів узгодження контурів. При менших відстанях ефективність передачі знижується внаслідок перезв'язки (overcoupling), при великих – через зменшення взаємної індуктивності (undercoupling).

Аналіз отриманих залежностей $|S_{21}|^2(d)$ показує, що ефективність передачі енергії визначається взаємним положенням антен та їх резонансним налаштуванням. При фіксованій робочої частоті 868 МГц збільшення індуктивності L веде до зміщення резонансної частоти системи у бік менших значень, тоді як зменшення L – до її зростання. Оптимальні значення підстроювальної індуктивності (в діапазоні 50-56 нГн) забезпечують максимальну частку переданої потужності, що досягає 0.55–0.6 (близько – 2.2 дБ) при відстані між антенами $d \approx 2$ см. При великих відстанях ефективність передачі енергії знижується внаслідок зменшення магнітного потоку, що пронизує приймальну котушку, а за дуже малих відстаней через перерозподіл мод і виникнення режиму перезв'язки.

Отримані результати узгоджуються із загальними закономірностями резонансної бездротової передачі енергії та підтверджують можливість оптимізації системи в діапазоні ближнього та перехідного електромагнітного поля. У практичному відношенні це вказує на існування стійкого діапазону робочих параметрів, в якому антени друкованої конструкції з елементами монтажу поверхневого типу 0805 можуть забезпечувати ефективну

передачу енергії на відстанях до декількох сантиметрів. Представлена методика моделювання може бути використана для подальших досліджень впливу геометрії, орієнтації та числа витків антен на характеристики зв'язку та узгодження.

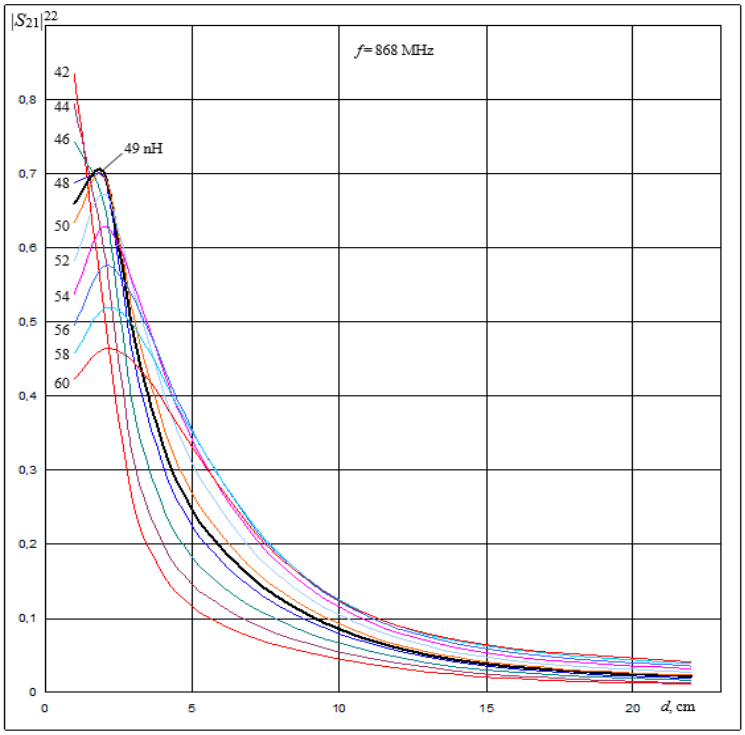


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта передачі потужності $|S_{21}|^2$ від відстані між антенами d при різних значеннях підстроювальної індуктивності L (значення L у нГн вказані поруч з кривими)

Висновки. Методом кінечних елементів у середовищі COMSOL Multiphysics проведено чисельне моделювання системи бездротової передачі енергії між двома кільцевими антенами, що працюють у діапазоні ультрависоких частот (868 МГц). Показано, що ефективність передачі енергії суттєво залежить від взаємного розташування антен та параметрів узгодження резонансних контурів, що визначаються підстроювальною індуктивністю. При фіксованій частоті 868 МГц спостерігається максимум коефіцієнта передачі потужності $|S_{21}|^2$ на відстані між антенами $d \approx 2$ см і значення індуктивності $L = 50–56$ нГн, що забезпечує оптимальне узгодження. При менших відстанях ефективність передачі обмежується ефектом перезв'язки (overcoupling), а при більших – зменшенням коефіцієнта магнітного зв'язку (undercoupling). Отримані результати підтверджують можливість практичної реалізації компактних друкованих антен з елементами поверхневого монтажу типу 0805, що забезпечують ефективну передачу енергії на малих відстанях, та можуть бути використані для оптимізації систем RFID та WPT ближньої дії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sample, A.P. *Experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer* [Text] / Sample A.P., Meyer D.A., Smith J.R. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – V. **58, № 2. P.** 544-554. Doi: https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2046002.

2. Dobkin D.M. *The RF in RFID: UHF RFID in Practice.* Elsevier, 2012. – 540 p. ISBN: 9780123948304.

3. Hui, S.Y.R. *A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer* [Text] / Hui S.Y.R., Zhong W., Lee C.K. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – V. 29. – № 9. – P. 4500-4511. Doi: https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2249670.

СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ШВИДКОДІЮЧОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ПЛАВАЛЬНОГО АПАРАТА

Налева Г. В., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-7841-6757
Мазур О. М., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-9316-288X
Онищенко О. А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-3766-3188
Національний університет "Одеська морська академія", Україна

Анотація: *у роботі наведено структурний синтез та аналіз ПІ²-регулятора струму, призначеного для швидкодіючих електромеханічних систем автономних плавальних апаратів. Показано, що врахування внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС та застосування двох інтегральних складових регулятора дозволяє підвищити астатизм, точність та стійкість замкненого контуру струму. Запропонована структура регулятора забезпечує швидкий вихід інтегральних каналів із насичення та зменшені обчислювальні витрати при цифровій реалізації у мікроконтролерах.*

Ключові слова: *електромеханічна система, регулятор струму, ПІ²-регулятор, проти-ЕРС, швидкодія, антинасичення, автономний плавальний апарат.*

STRUCTURAL MODEL OF THE CURRENT CONTROLLER FOR A HIGH-SPEED ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

Naleva G. V., Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-7841-6757
Mazur O. M., Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-9316-288X
Onishchenko O. A., D. Sc. (Tech.), Professor
https://orcid.org/0000-0002-3766-3188
National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

Abstract: *this paper addresses the structural synthesis and analysis of a PI²-current controller designed for high-dynamic electromechanical systems (EMS) in autonomous marine vehicles (AMVs). It is shown that taking into account the internal back-electromotive force (Back-EMF) feedback and employing two integral components within the controller allows for increased astatism, accuracy, and stability of the closed-loop current circuit. The proposed controller structure ensures fast saturation recovery of the integral channels and reduced computational costs during digital implementation on microcontrollers.*

Keywords: *electromechanical system, current controller, PI² controller, back-EMF, high-speed drive, anti-windup, autonomous surface vehicle.*

Вступ. Сучасні автономні (безпілотні) надводні плавальні апарати невеликого дедвейту мають безліч швидкодіючих електромеханічних систем. Це різного типу і призначення системи стабілізації, слідкування, наведення, навігації тощо. Головною об'єднуючою особливістю таких електромеханічних систем (ЕМС) є велика швидкість зміни струму електродвигуна у перехідних процесах і малий сумарний момент інерції (двигуна, передаточного механізму і об'єкта). Дуже мала електромеханічна стала часу $T_м$, яка обумовлена малим сумарним моментом інерції механізму, співрозмірна з електромагнітною сталою $T_е$ часу силової частини ЕМС. Якщо у ЕМС досить великої потужності (декілька кВт) можна нехтувати впливом внутрішньої проти-ЕРС, оскільки $T_м >> T_е$, то у ЕМС, де $T_м \cong T_е$, швидкість зміни швидкості (похідна) дуже велика і проти-ЕРС E суттєво впливає на як-

ість перехідних процесів і статичну помилку (максимальний рівень підтримуваного струму). У результаті це не дозволяє реалізувати всі перевантажувальні властивості двигуна ЕМС, зменшує основні показники точності і швидкодії слідкуючих, позиційних і стабілізуючих систем автономного плавального апарата (АПА).

У деяких випадках ця проблема ускладнюється у зв'язку із технічною неможливістю встановлення датчиків швидкості двигуна. Загалом це вирішується за рахунок встановлення датчика ЕРС, який визначає значення ЕРС додатковими вимірюваннями і оцінює швидкість ω обертання валу двигуна ($E \equiv \omega$). Для формування необхідних статичних (у головному – обмежувальної частини) електромеханічних характеристик ЕМС використовують додаткові вузли керованого струмообмеження.

Дослідження високошвидкісних ЕМС систем із внутрішніми контурами регулювання демонструють зростаючий інтерес до застосування регуляторів зі збільшеною інтегральною складовою, зокрема, структур типу $P + I + I$ (PI^2 – пропорційно-інтегрально-інтегральна структура). Використання такого класу PI^2 регуляторів зумовлене потребою забезпечення високої точності керування за наявності повільних, зокрема, рампових збурень, характерних для електроприводів зі змінним навантаженням.

Огляд літературних джерел. Одним із фундаментальних теоретичних джерел, присвячених аналізу PI^2-компенсаторів (як їх називають автори), є робота [1], у якій детально досліджено параметризацію та робастність компенсатора з передаточною функцією $W(s) = K_p + K_{i1}/s + K_{i2}/s^2$. Автори показують, що включення другого інтегратора істотно підвищує здатність системи компенсувати повільні збурення, але водночас зменшує запас стійкості, що потребує ретельного частотного синтезу та налаштування коефіцієнтів. Схожі висновки подано у [2], де проаналізовано різні низькочастотні компенсатори, у тому числі $P + I + I$, які застосовуються для покращення процесів регулювання у складних динамічних установках. У роботі наголошується, що другий інтегратор може слугувати ефективним інструментом для придушення довготривалих трендів помилки регулювання, однак його використання потребує додаткових заходів для забезпечення запасу стійкості за фазовим зсувом.

Прикладні принципи побудови регуляторів та внутрішніх зворотних зв’язків докладно висвітлено у фундаментальних монографіях [3-5]. У цих працях наведено моделі електричних машин та їх систем керування включно з впливом проти-ЕРС, структурою контурів струму, обмеженнями та реалізацією алгоритмів керування на цифрових процесорах (*DSP*). Зокрема, [5] детально розглядає проблеми насичення, впливу затримок і дискретизації, а також методи покращення швидкодії контурів струму, що є вкрай важливими у контексті розвитку регуляторів типу PI^2.

Подальший розвиток моделей цифрових електроприводів і сучасних алгоритмів керування представлено у роботі [6]. Автори узагальнюють сучасні підходи до аналізу та моделювання електроприводів із внутрішніми контурами. Наведені результати демонструють практичну значущість введення додаткових інтегральних складових у контурі регулювання ЕМС. Окремий пласт досліджень стосується проблеми інтегрального насичення (*wind-up*), яка особливо критична для структур із подвійним інтегратором. Огляд [7] узагальнює сучасні методи "*anti-windup*", що дозволяє забезпечувати стійкість та керованість системи за наявності нелінійностей типу "*Saturation*" і "*Dead-zone*". Класична робота з теорії керування [8] розглядає дробово-раціональні функції регуляторів як типові фазові компенсатори, що дозволяє використовувати цей принцип для корекції кореневого годографа та забезпечення стійкості і швидкодії систем стабілізації.

Основний матеріал. На рис. 1 наведена спрощена структурна схема ЕМС, яка входить до складу деяких систем стабілізації автономних плавальних апаратів (АПА). На рис. 1 позначено: ЗКРС – замкнений контур струму, ЕЧД та МЧ – електрична та механічна частини електричного двигуна, ВЗЗД – внутрішній зворотний зв'язок електричного двигуна, ДСЧ – датчик струму, ДЕРС – датчик ЕРС, РЕ – регулятор ЕРС, РС – регулятор струму, ДСО – вузол додаткового струмообмеження і формування статичних характеристик ЕМС.

Реалізація зворотного зв'язку за ЕРС (вузол 2) заснована на рішенні відомих рівнянь електричної рівноваги і механічного руху. Сигнал зворотного зв'язку за ЕРС для системи, що наведена на рис. 1, визначається передаточною функцією:

$$U_e(s) = \frac{k_н k_c k_м}{T_m s + 1}\left(\frac{U(s)}{T_e s + 1} - I(s)R_e\right), \qquad (1)$$

де k_c, $k_н$ – коефіцієнти зворотних зв'язків, відповідно, за струмом I та напругою U;
$k_м$ – масштабувальний (до швидкості) коефіцієнт.

Такий вимір дозволяє отримати наближену відповідність швидкості і ЕРС електродвигуна у динаміці. Це наближення тим точніше, чим ближче одна до одної сталі часу: датчиків струму і електромагнітна стала часу силової частини перетворювача.

Передаточна функція П-регулятора ЕРС, який набудовує ЕМС (див. рис. 1) на технічний оптимум, має вигляд:

$$W_{pe}(s) = \frac{k_c T_м}{2R_e k_e (2T_{μ1} + T_e)}, \qquad (2)$$

де k_e – коефіцієнт зворотного зв'язку за ЕРС.

З урахуванням наведеної структури, суттєвим перерегулюванням струму та його помітним статизмом, у замкненому контурі регулювання струму (ЗКРС) використано PI^2-регулятор струму (РС), компенсуючий внутрішній зворотній зв'язок за ЕРС у ЕМС:

$$W_{pc}(s) = \frac{R_c\left(T_м s (T_e s + 1) + 1\right)}{2 k_n k_c T_м (T_n + T_m) s^2}, \qquad (3)$$

де k_n і T_n – коефіцієнт передачі і стала часу силового перетворювача.

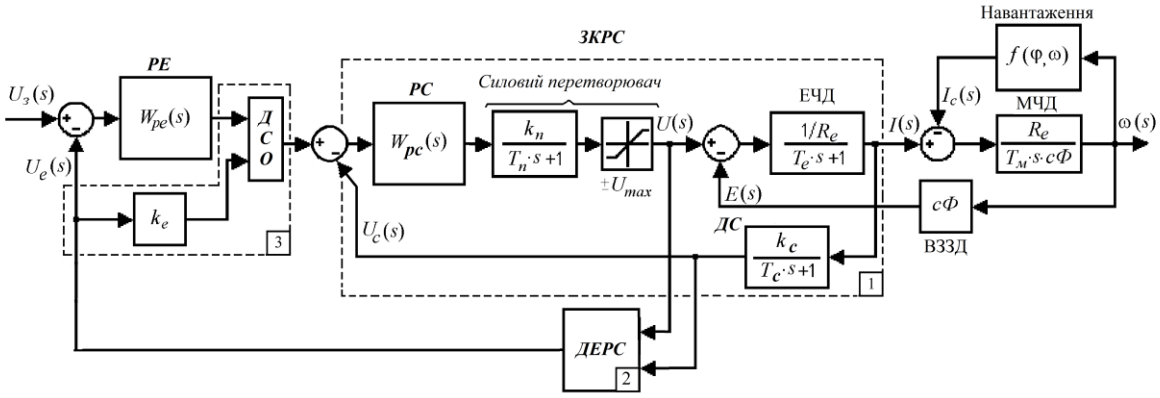


Рисунок 1 – Спрощена структурна схема ЕМС з регуляторами струму, ЕРС та додатковим струмообмеженням

Передаточна функція (3) часто зустрічається у літературі під назвою "фазовий компенсатор другого порядку" або "регулятор для систем із подвійним інтегруванням". Як показали модельні та експериментальні дослідження авторів, для такого типу регулятора струму фактором, який суттєво впливає на кінцеві динамічні показники ЗКРС, є необхідність найшвидшого виходу його інтегральних складових з насичення. Крім того, оскільки усі регулятори ЕМС мають цифрову реалізацію (за допомогою або 16-розрядних мікроконтролерів *TMS*320x24xx ф. *Texas Instruments*, або більш сучасних серій *STM*32), тому виникла необхідність у розробці структурної схеми регулятора струму, яка має мінімальну кількість операцій множення і акумулювання проміжних даних з можливістю незалежної набудови всіх коефіцієнтів РС.

Розроблена структурна схема (рис. 2) регулятора струму дозволила програмування дискретної передаточної функції регулятора у системах команд *TMS*320x24xx та *STM*32 з мінімальними обчислювальними витратами та роздільною набудовою кожного з коефіцієнтів. Таке рішення дозволило швидко виходити інтегральним складовим з насичення і

мати необхідне сумарне обмеження вихідного сигналу РС. На схемі, наведеної на рис. 2, мала некомпенсована стала часу контуру струму позначена, як $T_{\mu 1} = T_n + T_c$. Роздільну набудову коефіцієнтів здійснюють ланки: 1 – пропорційну складову; 2 і 3 – першу і другу інтегральні складові. Обмеження пропорційної складової і сумарного вихідного сигналу здійснюють ланки обмеження 7. Швидкий вихід з насичення інтегральних складових здійснюється елементами порівняння 4 і ланками 5 “зона нечутливості” ("мертва зона").

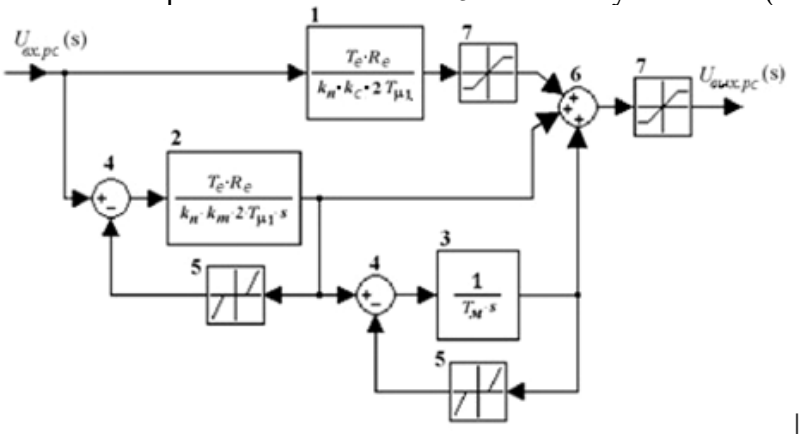


Рисунок 2 – Пропонована структурна схема ПІ²-регулятора струму швидкодіючої ЕМС

Висновки. Сучасна наукова література підтверджує обґрунтованість використання *PI²*-регуляторів для підвищення точності та астатизму контурів струму в швидкодіючих ЕМС. Дослідники підкреслюють необхідність обов’язкового застосування anti-windup-механізмів, корекції фази та врахування обмежень вихідних сигналів, що формує цілісну методологічну основу для аналізу, створення та вдосконалення ЕМС з такими *PI²*-регуляторами. Запропонована структурна схема ПІ²-регулятора може бути безпосередньо використана для реалізації швидкодіючих контурів струму у системах бездатчикового керування, зокрема в приводах з обмеженою сенсорикою та суттєвим впливом проти-ЕРС. Саме це дозволяє підвищити надійність і функціональну автономність електромеханічних комплексів плавальних апаратів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію цифрових алгоритмів антинасичення для двох інтегральних складових та на розробку методів автоматичного тюнінгу параметрів *PI²*-регуляторів з урахуванням змінних динамічних характеристик конкретної електромеханічної системи АПА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Monroy-Loperena R., Cervantes I., Alvarez-Ramirez J. Robustness and parametrization of the proportional plus double-integral controller. Industrial & Engineering Chemistry Research. 1999. Vol. 38(12). P. 4645–4653. DOI: 10.1021/ie980468z.

2. Belanger P. W., Luyben W. L. Design of low-frequency compensators for improvement of plantwide regulatory control. Industrial & Engineering Chemistry Research. 1997. Vol. 36(12). P. 5440–5453. DOI: 10.1021/ie970287h.

3. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford: Oxford University Press, 1998. 752 p. ISBN 9780198564652.

4. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 600 p. ISBN 0130910147.

5. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin: Springer, 2001. 521 p. DOI:10.1007/978-3-662-04055-7.

6. De Doncker R., Pulle D., Veltman A. Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control. Dordrecht: Springer, 2011. 411 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9851-6.

7. Zhang G., Furuta K. Design and Analysis of Double Integral PID Control Systems. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 1997. E80-A(3). P. 460–467. URL: https://pdfhost.io/v/UGg1Jp4jl_Zhang_1997_DoubleIntegralPID.

8. Ogata, K. Modern Control Engineering. 5th Edition, Pearson, 2010. 412 p. https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІЖФАЗНИХ ЖОРСТКИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ З КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

[1]**Кривий О.Ф**, д. ф.-м. н., професор
https://orcid.org/0000-0001-8704-4791
[2]**Морозов Ю.О.**, к. ф.-м. н., доцент
https://orcid.org/ 0000-0003-4027-2353
[1]Національний університет «Одеська морська академія»
[2]Державний університет «Одеська політехніка»

Анотація: *Наявність міжфазних жорстких включень суттєво впливають на механічні властивості деталей з кусково-однорідних матеріалів а при певних умовах призводять до їх руйнування. Для визначення міцності і встановлення вимог, що пред'являються до їх якості, побудована математична модель, яка дозволяє дослідити вплив включень на міцність таких матеріалів. Запропоновано узагальнений метод граничних елементів та проведено чисельний аналіз поведінки стрибка напружень та кута повороту включення.*

Ключові слова: *кусково-однорідні матеріали. кільцеве міжфазне включення, математична модель.*

STUDY OF THE INFLUENCE OF INTERPHASE RIGID INCLUSIONS ON THE STRENGTH OF PARTS MADE OF PIECEWISE HOMOGENEOUS MATERIALS

Kryvyi O. F., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0001-8704-4791
Morozov Yu. O., Associate professor
https://orcid.org/ 0000-0003-4027-2353
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa Polytechnic State University

Abstract: *The presence of interphase hard inclusions significantly affects the mechanical properties of parts made of piecewise homogeneous materials and, under certain conditions, leads to their destruction. To determine the strength and establish quality requirements, a mathematical model has been developed that allows the influence of inclusions on the strength of such materials to be investigated. A generalized boundary element method has been proposed and a numerical analysis of the behavior of stress jumps and the angle of rotation of inclusions has been performed.*

Keywords: *piecewise homogeneous materials. annular interfacial inclusion, mathematical model.*

Кільцеве міжфазне включення в площині розділу матеріалів включення може бути:
дефектом структури: наприклад, область з іншим хімічним складом, пористістю чи іншою кристалічною структурою, що утворилася у процесі виробництва чи експлуатації матеріалу.

Специфічною формою армування: у композиційних матеріалах можуть використовуватися кільцеві елементи поліпшення певних механічних властивостей.

Результатом фазового перетворення: у процесі зміни температури або тиску одна фаза може перетворюватися на іншу, і на межі розділу може утворюватися кільцева з проміжними властивостями або складом.

Як правило, такі включення можуть істотно впливати на локальні механічні, теплові або електричні властивості матеріалу, особливо на міцність і довговічність межі розділу фаз. Тому дослідження розподілу напружень в околі таких дефектів, які містяться в області з'єднання пружних матеріалів при різних умовах контактної взаємодії із середовищем, є важливою практичною і складною математичною задачею.

Розглянуто задачу про міжфазне жорстке кільцеве включення яке знаходиться в умовах повного зчеплення з півпросторами. Використавши підхід запропонований в ро-

ботах [1-6] отримана система трьох двовимірних СІР, яка у матричному вигляді відносно невідомої вектор функції $\boldsymbol{\chi}^- = \{\chi_k^-(x,y)\}_{k=1,2,3}$ має вигляд:

$$\frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\left(\frac{\mathbf{M}}{r_0}\boldsymbol{\chi}^- - \mathbf{K}(x-t,y-\tau)\boldsymbol{\chi}^-\right)dtd\tau = \mathbf{F} \qquad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} q_{41} & 0 & 0 \\ 0 & q_{32} & 0 \\ 0 & 0 & q_{32} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} 0 & q_{42}\dfrac{y-\tau}{r_0^2} & q_{42}\dfrac{x-t}{r_0^2} \\ -q_{31}\dfrac{y-\tau}{r_0^2} & -q_{32}^-\partial_1\dfrac{x-t}{r_0} & q_{32}^-\partial_1\dfrac{y-\tau}{r_0} \\ -q_{31}\dfrac{x-t}{r_0^2} & q_{32}^-\partial_2\dfrac{x-t}{r_0} & -q_{32}^-\partial_2\dfrac{y-\tau}{r_0} \end{pmatrix},$$

$$r_0 = \sqrt{(x-t)^2+(y-\tau)^2}$$

$$\mathbf{F}(x,y) = \{f_j^{(2)}\}_{j=1,2,3}; \; f_j^{(2)} = \frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\zeta_{j+3}^0[q_{33}\partial_{3-j}\frac{y-\tau}{r_0^2} + \tilde{} \qquad]dtd\tau +$$

$$+(1-q_{33}^+)\zeta_{j+3}^0 - q_{33}^-\frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\zeta_{6-j}^0\partial_{3-j}\frac{y-\tau}{r_0^2}dtd\tau - q_{34}\frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\vartheta^+\partial_1\frac{1}{r_0}dtd\tau, j=1,2$$

$$f_3^{(2)} = (1-q_{44})\vartheta^+(x,y) + 2\zeta_6^0 + q_{43}\frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\zeta_4^0\partial_1\frac{1}{r_0}dtd\tau + q_{43}\frac{1}{2\pi}\iint\limits_{\Omega}\zeta_5^0\partial_2\frac{1}{r_0}dtd\tau$$

Де $\zeta_6^{\pm} = \zeta_6^0 + \vartheta_0^{\pm}(x,y), \zeta_k^{\pm} = \zeta_k^0, k = 4,5, (x,y)\in\Omega$, $\zeta_4^0 = \delta_1 - \phi_z y, \zeta_5^0 = \delta_2 - \phi_z x, \zeta_6^0 = \delta_3 + \phi_x y + \phi_y x -$ функції, які описують розташування граней включення після деформації, $\vartheta_0^{\pm}(x,y)$ – задають форму включення відповідно при $z = \pm 0$; $\delta_k, k = 1,2,3$, ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z – поступальні переміщення включення та кути повороту включення навколо відповідних осей.

Величини $\delta_k, k = 1,2,3$; ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z – визначимо із шести рівнянь рівноваги

$$\iint\limits_{\Omega}\chi_k^-(x,y)dxdy = P_{4-k}, k = 1,2,3, \iint\limits_{\Omega}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\chi_k^-(x,y)dxdy = \begin{pmatrix} M_2 \\ M_1 \end{pmatrix}, \iint\limits_{\Omega}(x\chi_2^-(x,y) - y\chi_3^-(x,y))dxdy = M_3, \quad (2)$$

Для кругових в плані, симетричних включень при змішаних умовах контакту і довільних навантаженнях отримані точні розв'язки [], які дозволяють визначити розподіл напружень в площині з'єднання різних трансверсально-ізотропних просторів в їх околі.

Пропонується наступний чисельно – аналітичний метод. У рівняннях () перейдемо до циліндричної системи координат (ρ,φ,z) і застосувавши скінченне перетворення Фур'є отримаємо систему інтегральних рівнянь відносно трансформант $V_n^{j,-}(\rho)$ шуканих функцій:

$$\int\limits_a^b \mathbf{V}_n^-(\rho)\mathbf{M}_n(r,\rho)\rho d\rho = \mathbf{Q}_n(r), \qquad (3)$$

$$\mathbf{M}_n(r,\rho) = \begin{pmatrix} -2q_{31}w_{n+1,n}(r,\rho) & -2q_{31}w_{n-1,n}(r,\rho) & 2q_{41}w_{n,n}(r,\rho) \\ q_{32}^+w_{n+1,n+1}(r,\rho) & -q_{32}^-w_{n-1,n+1}(r,\rho) & -q_{42}w_{n,n+1}(r,\rho) \\ -q_{32}^-w_{n+1,n-1}(r,\rho) & q_{32}^+w_{n-1,n-1}(r,\rho) & q_{42}w_{n,n-1}(r,\rho) \end{pmatrix}, \; w_{\mu,м}(r,\rho) = \int\limits_0^{\infty} J_{\mu}(rt)J_{\nu}(\rho t)dt,$$

$$v_1^-(\rho,\varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n^j(\rho)e^{in\varphi}, j = 1,2 \; V_n^{j,-}(\rho) = \Phi_n[v_j^-] \equiv \frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\pi}^{\pi} v_j^-(\rho,\varphi)e^{-in\varphi}d\varphi, j = 1,2$$

{~ $\{\langle\sigma_z\rangle^{\pm}, \langle\tau_{z\varphi}\rangle^{\pm}, \langle\tau_{z\rho}\rangle^{\pm}, \langle u_{\varphi}\rangle^{\pm}, \langle u_{\rho}\rangle^{\pm}, \langle\omega\rangle^{\pm}\}$ ~ ~ ~ $\tau^{\pm}(\rho\cos\varphi, \rho\sin\varphi) = e^{i\varphi}$~

Якщо, контур, який обмежує область Ω є гладким, то характер поведінки розв'язків на краю включення буде визначатись типом контактної взаємодії включення із середовищем, отже, якщо скористатись результатами роботи [27], можемо при $\rho=\sqrt{x^2+y^2}\to a$ мають степеневі особливості із показниками $-0,5\pm i\alpha_0$ і $-0,5$. Пружні сталі $-\alpha_0$ виражаються [3] через комбінації коефіцієнтів узагальненого закону Гука і задовольняють умовам $0<\alpha_0<1/2$. Наприклад, для симетричного навантаження, коли $n=0$ система (3) має вигляд

$$-q_{31}\int_a^b \mathrm{V}_0^{1,-}(\rho)l_{1,0}(\rho)\rho d\rho+\int_a^b \mathrm{V}_0^{2,-}(\rho)l_{1,1}(\rho)\rho d\rho=0$$
$$q_{41}\int_a^b \mathrm{V}_0^{1,-}(\rho)l_{1,1}(\rho)\rho d\rho+\int_a^b \mathrm{V}_0^{2,-}(\rho)l_{0,1}(\rho)\rho d\rho=0 \qquad (4)$$
$$(q_{32}^{+}-q_{32}^{-})\int_a^b \mathrm{V}_0^{3,-}(\rho)l_{1,1}(\rho)\rho d\rho=2\phi_z\rho$$

$$\begin{Bmatrix} l_{0,0}(r_q,\rho) \\ l_{1,1}(r_q,\rho) \end{Bmatrix}=\frac{2}{\pi}\begin{cases} \begin{Bmatrix} r_q^{-1} \\ \rho^{-1} \end{Bmatrix}\{\sum_{j=0}^{n}\begin{Bmatrix} a_j \\ g_j \end{Bmatrix} r_q^{-2j}(r_q^2-\rho^2)^j+\ln\frac{r_q^2}{r_q^2-\rho^2}\sum_{j=0}^{n}\begin{Bmatrix} b_j \\ h_j \end{Bmatrix} r_q^{-2j}(r_q^2-\rho^2)^j\} & \rho<r_q \\ \begin{Bmatrix} \rho^{-1} \\ r_q^{-1} \end{Bmatrix}\{\sum_{j=0}^{n}\begin{Bmatrix} a_j \\ g_j \end{Bmatrix} \rho^{-2j}(\rho^2-r_q^2)^j+\ln\frac{\rho^2}{\rho^2-r_q^2}\sum_{j=0}^{n}\begin{Bmatrix} b_j \\ h_j \end{Bmatrix} \rho^{-2j}(\rho^2-r_q^2)^j\} & \rho>r_q \end{cases}$$

$$l_{1,0}(\rho)=\frac{\rho}{r_q}\begin{cases}1 & \rho<r_q\\ 0 & \rho>r_q\end{cases}, l_{0,1}(\rho)=\frac{1}{\rho}\begin{cases}0 & \rho<r_q\\ 1 & \rho>r_q\end{cases}$$

В разі, коли задано крутильне навантаження, буде тільки останнє рівняння з системи (4) для розв'язку якого застосовано узагальнений метод граничних елементів.

Подамо розв'язок системи так

$$\mathrm{V}_0^{3,-}(\rho)=\vartheta_{j,3}(\rho), j=\overline{1,N}$$
$$\vartheta_{j,3}(\rho)=\frac{c_{j,3}}{(\rho-a)^{0.5}(b-\rho)^{0.5}}\rho\in\Delta_j, j=\overline{1,N}, \qquad (5)$$
$$[a,b]=\bigcup \quad \rho_j,\rho_{j+1}], j=0\ldots \quad \ldots$$

Підставивши (5) в інтегральне рівняння (4) та третє рівняння рівноваги з (3), яке в полярній системі координат набуває вигляду

$$\iint_\Omega (x\chi_2^{-}(x,y)-y\chi_3^{-}(x,y))dxdy=\frac{1}{2i}\int_{-\pi}^{\pi}d\varphi\int_a^b(v_2^{-}(\rho,\varphi)-\overline{v}_2^{-}(\rho,\varphi))\rho^2d\rho=$$
$$=\frac{1}{2i}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\int_{-\pi}^{\pi}d\varphi\int_a^b(V_n^{2,-}(\rho)e^{in\varphi}-\overline{V}_n^{2,-}(\rho)e^{-in\varphi})\rho^2d\rho=\pi\int_a^b V_0^{3,-}(\rho)\rho^2d\rho=M_3$$
$$\pi\int_a^b V_0^{3,-}(\rho)\rho^2d\rho=\pi\sum_{j=1}^{N}c_{j,3}\int_{\Delta_j}\frac{\rho^2d\rho}{(\rho-a)^{0.5}(b-\rho)^{0.5}}=M_3 \qquad (6)$$

отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь

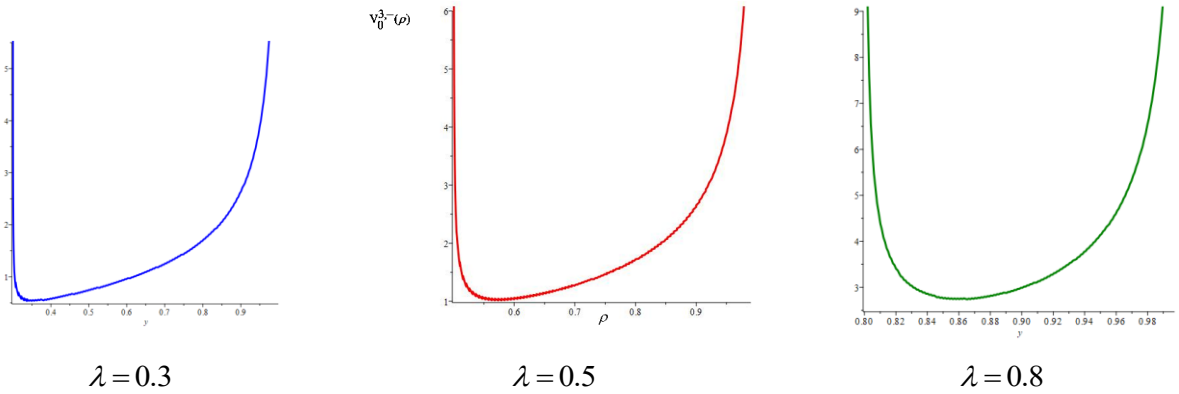
$$\int_a^b \mathrm{V}_0^{3,-}(\rho)l_{1,1}(r_q,\rho)\rho d\rho=\sum_{j=1}^{N}c_{j,3}^{*}\int_{\Delta_j}l_{1,1}(r_q,\rho)\frac{\rho d\rho}{(\rho-a)^{0.5}(b-\rho)^{0.5}}=1, c_{j,3}^{*}=\frac{c_{j,3}}{d_1}, d_1=\frac{2\phi_z}{(q_{32}^{+}-q_{32}^{-})},$$

а, далі з рівняння (6) отримаємо формулу для обчислення ϕ_z

$$\phi_z = M_3 \frac{(q_{32}^{+} - q_{32}^{-})}{2\pi\eta}, \eta = \sum_{j=1}^{N} c_{j,3}^{*} \int_{\Delta_j} \frac{\rho^2 d\rho}{(\rho - a)^{0.5}(b - \rho)^{0.5}},$$

Таблиця 1 – Залежність кута повороту ϕ_z від кількості граничних елементів та параметра $\lambda = a/b$

N	80	90	95
λ	0.3		
ϕ_z	-0.93945016	-0.93944440	-0.939442440
λ	0.5		
ϕ_z	-0.9429097	-0.94290720	-0.942905404
λ	08		
ϕ_z	-0.99821583454	-0.99821537907	-0.99821491



$\lambda = 0.3$ $\lambda = 0.5$ $\lambda = 0.8$

Рисунок 1 – Залежність скачка напружень від $\lambda = a/b$

Висновки. Запропоновано і проведена апробація ефективного чисельно-аналітичного методу розв'язання двовимірних сингулярних інтегральних рівнянь. Даний підхід може бути застосований для будь-яких міжфазних включень при різних типах контактної взаємодії із неоднорідним трансверсально-ізотропним простором.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kryvyi, O.F., Morozov, Y. Influence of Concentrated Forces on an Interface Inclusion under the Conditions of Smooth Contact in the Inhomogeneous Transversely Isotropic Space. J Math Sci 279, 197–212 (2024). https://doi.org/10.1007/s10958-024-07005-3
2. Кривий О. Ф., Морозов Ю. О. Особливості поля напружень в околі міжфазного кругового включення при змішаних умовах контакту із кусково-однорідним трансверсально-ізотропним простором. Прикладна механіка. 2024. Т. 60, № 3. С. 91-100. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001493980
3. Kryvyi, O.F., Morozov, Y.O. Influence of Concentrated Forces and Heat Sources on the Distribution of Stresses in the Interface of Two Different Transversely Isotropic Half Spaces. J Math Sci 274, 730–745 (2023). https://doi.org/10.1007/s10958-023-06632-6
4. . Kryvyi, O.F., Morozov, Y.O. Fundamental Solutions for a Piecewise-Homogeneous Transversely Isotropic Elastic Space. J Math Sci 270, 143–156 (2023). https://doi.org/10.1007/s10958-023-06337-w
5. O F Kryvyi and Yu O Morozov Inhomogeneous transversely isotropic space under influence of concentrated power and temperature sources// Journal of Physics: Conference Series 2231 (2022) 012016 doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2231/1/012016

Секція 6. РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА

A SURVEY OF WPA2 WEAKNESSES: PIXIE DUST, PMKID EXTRACTION AND KEY REINSTALLATION ATTACKS

Shpinareva I.M., PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor
https://orcid.org/0000-0001-9208-4923
Strashnov V.V., Bachelor Student
https://orcid.org/0009-0009-6165-217X
Odesa I.I. Mechnikov National University

Abstract: *The document analyses key WPA2 vulnerabilities and methods of exploiting them: Pixie Dust (WPS), interception and PMKID selection (via direct request to the access point and via deauthentication with 4-way handshake interception) and key reinstallation attack (KRACK).*

Keywords: *WPA2; WPS; Pixie Dust; PMKID; 4-way handshake; deauthentication; KRACK; network security; PSK; Wi-Fi vulnerabilities*

ОГЛЯД ВРАЗЛИВОСТЕЙ WPA2: PIXIE DUST, ВИТЯГНЕННЯ PMKID ТА АТАКИ ПОВТОРНОЇ ІНСТАЛЯЦІЇ КЛЮЧІВ

Шпінарева І.М., к.ф.-м.н., доц.
https://orcid.org/0000-0001-9208-4923
Страшнов В.В., студент
https://orcid.org/0009-0009-6165-217X
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Анотація: *У роботі проаналізовано ключові вразливості WPA2 та методи їх експлуатації: Pixie Dust (WPS), перехоплення та підбір PMKID (через прямий запит до точки доступу та через deauthentication з перехопленням 4-way handshake) і атака повторного встановлення ключів (KRACK).*

Ключові слова: *WPA2; WPS; Pixie Dust; PMKID; 4-way handshake; deauthentication; KRACK; мережева безпека; PSK; вразливості Wi-Fi*

Formulation of a practical problem

The WPA2 protocol is the security standard for almost all modern Wi-Fi networks, but recent studies have revealed significant vulnerabilities in it. For example, the KRACK attack exposed ‘serious weaknesses in WPA2’ – an attacker within range can break the encryption and read information that was previously considered secure[1]. In addition, it has been found that about 80% of network devices remain vulnerable to the Pixie Dust attack even a decade after its discovery[2]. Taken together, this means that the confidentiality of WPA2 networks is at risk, and significant implementation errors (WPS, incorrect handshake processing) increase the risk of PSK and session keys being exposed.

List of tasks to be solved

1. Analyse known vulnerabilities of the WPA2 protocol and related components (in particular, WPS).
2. Describe and investigate the main methods of attacks on WPA2: Pixie Dust (WPS vulnerability), PMKID capture (without a client and via handshake), and KRACK.
3. Assess the level of threat to WPA2 security resulting from the use of these attacks.
4. Formulate recommendations for protecting WPA2 networks based on the results obtained.

Presentation of the essence of the study

1. Pixie Dust Attack

The Pixie Dust attack is a fast and effective method of hacking Wi-Fi networks that use the Wi-Fi Protected Setup (WPS) feature. The vulnerability lies not in the WPA2 protocol itself, but in the implementation of WPS, specifically in the insufficient entropy (randomness) of certain cryptographic values (nonces), which allows an attacker to perform a quick offline brute-force attack to obtain the WPS PIN code.

1.1 Prerequisite - WPS Protocol and Its Weak Link

WPS was developed to simplify the connection of devices to a Wi-Fi network. The standard WPS authentication mechanism requires an 8-digit PIN code to be entered[2]. The vulnerability exploited by Pixie Dust is related to the exchange of M3 and M7 messages during the WPS process.

In this exchange, devices (the registrar, usually the client, and the enrollee, usually the router) exchange keys and random numbers called nonces (number used once).

$-E-S1$ (Enroller Nonce 1);

$-R-S1$ (Registrar Nonce 1);

$-E-S2$ (Enroller Nonce 2);

$-R-S2$ (Registrar Nonce 2).

Key weakness: WPS uses a PIN code as the initial seed for generating authorisation hashes (AuthHash) and master keys (PKE). To verify the correctness of the PIN code, the router sends two key elements in plain text: $E-Hash1$ and $E-Hash2$, which are hashes calculated based on the PIN code, MAC address, and exchanged nonce.

1.2 How Pixie Dust Attacks Work

The Pixie Dust attack (often implemented by the Reaver or WPS-Hack tool) exploits the fact that some manufacturers (notably those with Ralink, Broadcom, Atheros, and Realtek chipsets) use insufficiently random (weak) values for their nonces (especially $E-S1$ and $R-S1$ or $E-S2$ and $R-S2$).

1.2.1 Stage 1: Interception of Cryptographic Elements

The attacker, while within range of the Wi-Fi network:

1. Starts a WPS session with a router (enroller), imitating a registrar.
2. Intercepts the necessary cryptographic data that the router sends in response:

$-E-Hash1$;

$-E-Hash2$;

$-PKE$ (Public Key Enroller);

$-R-Hash1$ (registrar response);

$-R-Hash2$ (registrar response);

$-Nonce$ (especially $E-S1$ and $R-S1$). The generation of these values with low entropy (e.g., based on system time, MAC address, or other predictable data) is the Achilles heel.

1.2.2 Stage 2: Offline Search and Factorisation (Attack on Reduced Complexity)

Instead of trying to guess an 8-digit PIN (which would require up to 10^8 attempts), Pixie Dust performs offline brute force attacks using intercepted data.

1. Weak Nonce: If $E-S1$ and $R-S1$ (or $E-S2$ and $R-S2$) were weak, they could be predicted or quickly recovered (e.g., by brute-forcing a small range of values), or their recovery could be skipped altogether, as some WPS implementations use them in such a way that they can be excluded from the equation.

2. PIN attack: The attack boils down to brute-forcing possible PIN codes (the first 7 digits, since the 8th is a checksum) and calculating the corresponding control hashes (AuthHash) using intercepted weak nonces.

3. Comparison: The calculated hash is compared with the intercepted $E-Hash1$ and $E-Hash2$. Since the entire process takes place on the attacker's computer (offline), there are no restrictions on the number of attempts imposed by the router (e.g., blocking after 3 failed attempts).

2. PMKID attack (without client)

The attack, presented in 2018, exploits a vulnerability in the way some access points (APs) handle association requests and cache keys. It allows an attacker to obtain a cryptographic hash (PMKID) that is directly related to the PMK (Pairwise Master Key) and, therefore, to the PSK (Pre-Shared Key), without having to intercept the entire 4-way handshake[3].

2.1 Key Components: PMK and PMKID

To understand the attack, it is important to distinguish between two key elements:

PMK (Pairwise Master Key): This is a 256-bit master key that forms the basis for all session keys in WPA2. It is not your password, but it is generated from it. The process looks like this:

$$PMK = PBKDF2(PSK, SSID, 4096\ iterations, 256\ bits)$$

Where PSK is the network password (Pre-Shared Key) and SSID is its name.

PMKID (PMK Identifier): This is the identifier or hash of the PMK itself. It is used by the access point for caching. When a client successfully authenticates, the AP stores the PMK and creates a PMKID as a 'shortcut' to that PMK. PMKID formula:

$$PMKID = HMAC - SHA1 - 128(PMK, "PMK\ Name" + BSSID + StationMAC)$$

Where BSSID is the MAC address of the access point, and StationMAC is the MAC address of the client. Key point: If you can guess the PSK, you can calculate the PMK, and then, knowing the MAC addresses, you can calculate the PMKID[3]. A PMKID attack reverses this process: it obtains the PMKID and tries every possible PSK until the calculated PMKID matches the captured one.

2.2 Attack Mechanism

The attack process (often performed by tools such as hcxtools and hashcat) consists of three main stages:

2.2.1 Stage 1: Request for Association (Client Simulation).Knowing the BSSID (MAC) and SSID of the target network, the attacker sends a single special frame: Association Request.

– This frame simulates an attempt by a new client (with the attacker's MAC address) to connect to the network.

– The frame must contain an RSN (Robust Security Network) element, which informs the access point that the client supports WPA2 and is ready for authentication.

2.2.2 Stage 2: Obtaining PMKID (AP Response)

The vulnerable access point receives this request. It does not yet know whether the client's password is correct, but it checks its PMK cache.

1. If the access point supports PMK caching (which is necessary for features such as 802.11r Fast Roaming, but is often enabled even without it), it sends the first EAPOL message of the 4-way handshake in response.
2. It is in this first EAPOL frame, in the special RSN field, that the PMKID is contained.
3. The attacker intercepts this single frame and extracts three vital pieces of data from it:

– Captured PMKID

– BSSID (AP MAC)

– StationMAC (attacker's MAC address)

2.2.3 Stage 3: Offline Brute-Force

This is the 'heart' of the attack. The attacker does not need further contact with the router. The entire brute force process takes place offline on their own equipment (usually using a GPU).

1. The attacker takes a dictionary of probable passwords (PSK).
2. For each candidate PSK_guess from the dictionary, it performs the same two calculations as the router:

– Calculate $PMK_guess = PBKDF2(PSK_guess, SSID, \dots)$

– Calculate $PMKID_guess = HMAC - SHA1(PMKID_guess, \dots + BSSID + _StationMAC)$

3. Comparison:

– If PMKID_guess matches the Captured PMKID, the password has been found.

– If not, the next password from the dictionary is taken.

This process is extremely efficient (for example, in hashcat this is mode -m 16800) and can try billions of combinations per second.

3. PMKID attack (interception of a 4-way handshake by deauthentication)

This classic method is a two-phase attack that exploits a weakness in the management frames of the 802.11 protocol and the nature of the WPA2 4-Way Handshake.

3.1 Attack Mechanism

3.1.1 Stage 1: Forced Deauthentication (Deauth).The attacker finds the MAC addresses of the access point (BSSID) and the connected client (StationMAC). Since 802.11 control frames are not encrypted, he sends a spoofed deauth packet to the client on behalf of the access point. The client, considering the frame to be legitimate, immediately disconnects and automatically initiates the reconnection process.

3.1.2 Stage 2: Interception of the 4-Way Handshake

When the client reconnects, a 4-way WPA2 handshake occurs. An attacker in monitoring mode records these four EAPOL frames to obtain key data for the attack: two random numbers (ANonce from the AP and SNonce from the client), MAC addresses (BSSID/StationMAC) and MIC (Message Integrity Code). This MIC, calculated based on the PSK, is what allows further offline brute force attacks.

3.1.3 Stage 3: Offline Brute-Force.The PMKID attack's offline phase is the core of the process, carried out entirely on the attacker's equipment (typically utilizing a GPU), meaning no further contact with the router is required. The attacker takes a dictionary of probable passwords (PSK) and, for each candidate, performs the same cryptographic calculations as the router: first calculating the assumed PMK, and then the PMKID_guess. If the calculated PMKID_guess matches the Captured PMKID, the password is found.

4. Key Reinstallation Attack (KRACK).This attack exploits a flaw in the WPA2 protocol discovered by Wang and Piesens in 2017. When a client receives a repeated message M3 from the handshake (due to packet loss), it re-establishes the same session key and resets the counters (nonce, packet number) to their initial values[1]. Since the key in WPA2 should only be used once, such a reset violates cryptographic conditions and allows the same key to be reused. As a result, KRACK allows an attacker to decrypt transmitted packets, repeat or modify their contents[1]. The initial research shows that KRACK can be used to steal passwords, cookies, and other sensitive data, as well as inject malicious traffic into a session[1].

Conclusions. The attacks analysed show that although WPA2 cryptography remains strong in essence, its practical security largely depends on implementation and configuration. For example, WPA2 itself protects even complex passwords, but the WPS (Pixie Dust) vulnerability allows it to be bypassed. On the other hand, flaws in the handshake procedure (KRACK) indicate that any WPA2 implementation could be vulnerable to key reinstallation, which leads to key reuse. As a result, the threat of WPA2 must be assessed on a case-by-case basis: when using modern devices with updated firmware and WPS disabled, the risks are significantly reduced. However, the vulnerability of PMKID attacks and the possibility of forced handshakes make WPA2-PSK networks vulnerable to dictionary password attacks. Thus, WPA2 remains sufficiently secure when properly configured (complex key, WPS disabled, management frame protection enabled, etc.), but otherwise, the attacks discussed above can pose a serious threat.

LITERATURE

1. KRACK Attacks: Breaking WPA2 / M. Vanhoef. - 2017. - URL: https://www.krackattacks.com/

2. Ribeiro, A. Pixie Dust vulnerability persists a decade on, exposing systemic IoT and networking risks / A. Ribeiro // Industrial Cyber. - 2025. - 19 September. - URL: https://industrialcyber.co/threats-attacks/pixie-dust-vulnerability-persists-a-decade-on-exposing-systemic-iot-and-networking-risks/

3. Díaz, Ó. A. PMKID Attacks: Debunking the 802.11r Myth / Ó. A. Díaz // NCC Group. - 2025. - URL: https://www.nccgroup.com/research-blog/pmkid-attacks-debunking-the-80211r-myth/

4. WPA/WPA2 cracking, PMKID, Evil Twin... Overview of attacks and threats to Wi-Fi in 2022 / Consultant CyberSecura // CyberSecura. - 2024. - 15 March. - URL: https://www.cybersecura.com/en/post/overview-of-attacks-and-threats-to-wifi-in-2022

СКАСУВАННЯ НЕНАВМИСНОГО ЦИФРОВОГО СЕЛЕКТИВНОГО ВИКЛИКУ ЛИХА У ГМЗЛБ

Шишкін О.В., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-9781-9391
Пашенко О.Л., старший викладач
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Робота присвячена аналізу причин, процедур та технічних аспектів скасування ненавмисних викликів лиха, створених за допомогою цифрового селективного виклику (ЦСВ) у ГМЗЛБ. Проведено аналіз вимог Резолюції IMO MSC.514(105), положень Рекомендації ITU-R M.493 та змін у процедурах відповідно до Резолюцій WRC-2019 і WRC-2023. На тренажері ГМЗЛБ SAILOR TGS 6000 досліджено три сценарії дій оператора. Запропоновано узагальнену формулу скасування лиха та окреслено необхідність підвищення компетентності суднових вахтових офіцерів.*

Ключові слова*: ЦСВ, ГМЗЛБ, виклик лиха, самоскасування, скасування лиха*

CANCELLATION OF THE INADVERTENT DISTRESS ALERTS IN THE GMDSS

Shyshkin O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor
https://orcid.org/0000-0002-9781-9391
Pashenko O.L., M.Sc., Senior Lecturer
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
National university “Odesa maritime academy”

Abstract: *The study is devoted to the analysis of the causes, procedures and technical aspects of cancelling unintentional distress alerts generated through Digital Selective Calling (DSC) within the GMDSS. The requirements of IMO Resolution MSC.514(105), the provisions of ITU-R Recommendation M.493, and the procedural changes introduced by WRC-2019 and WRC-2023 have been examined. Three operator action scenarios were investigated using the SAILOR TGS 6000 GMDSS simulator. A generalized distress cancellation formula has been proposed, and the need to enhance the competence of ship’s watch officers has been outlined.*

Keywords: *DSC, GMDSS, distress alert, self-cancellation, distress cancellation.*

Вступ.Одним з найбільш дієвих способів здійснення оповіщень про лихо, якщо таке трапляється, в Глобальній морській системі зв’язку під час лиха та для забезпечення безпеки (ГМЗЛБ) є цифровій селективний виклик (ЦВВ) в діапазонах УКХ та ПХ/КХ радіохвиль, якій може використовуватись в усіх морський районах ГМЗЛБ в напрямках судно-судно та судно-берег на будь яких відстанях в залежності від обраної частоти виклику. Система ЦВВ (англ. Digital Selective Calling, DSC) [1] від самого впровадження ГМЗЛБ є базовою у наземному зв’язку, яка забезпечила розвиток сучасних цифрових систем морського призначення VDES, NAVDAT. Беззаперечною перевагою ЦВВ на відміну від засобів супутникового зв’язку Інмарсат, Ірідіум та аварійного радіобуя (EPIRB) 406 МГц є те, що виклик лиха безпосередньо отримується морськими судна, які потенційно можуть швидко надати допомогу, а не як результат ретрансляції береговими станціями в системах SafetyNet, SafetyCast, NAVTEX.

Але з самого початку існування ГМЗЛБ існує проблема ненавмисного передавання викликів лиха ЦВВ та неналежного їх скасування. Резолюція IMO MSC.514(105) від 28 квітня 2022 р. [2] закликає дослівно національні адміністрації:

.1 інформувати судновласників та моряків про наслідки зростання кількості хибних сповіщень про лихо;

.2 вжити заходів, щоб судна могли належним чином реєструвати все обладнання ГМЗЛБ, та забезпечити легкий доступ до цих реєстраційних даних для рятувальних координаційних центрів;

.3 розглянути можливість впровадження та використання національних правоохоронних заходів для переслідування тих, хто

- ненавмисно передає хибний сигнал лиха без належного скасування або не реагує на сигнал лиха через неправильне використання або недбалість;

- неодноразово та навмисно передає хибний сигнал лиха.

Актуальність проблеми ненавмисних викликів ЦВВ та їх коректного скасування, вирішення якої має бути у масштабі світового судноплавства, підкреслюється двома Резолюціями Всесвітньої Радіо Конференції стосовно процедури скасування ненавмисних викликів 2019 і 2023 років [3, 4].

Ціллю доповіді є аналіз процедури скасування ненавмисних ЦВВ лиха на основі досліджень роботи тренажеру ГМЗЛБ типу SAILOR TGS 6000 та формулювання найбільш дієвої формули скасування лиха в умовах різноманіття виробників та поколінь суднової апаратури радіозв'язку.

Застосована методика досліджень базується на наступних припущеннях:

1) Тренажер TGS 6000 побудований на основі фірмового програмного забезпечення SAILOR, яке застосоване у реальній сертифікованій Зазначений апаратурі, яка виготовляється цією ж компанією.

2) Зазначений тренажер має належну сертифікацію та виконує в точності такі ж самі функції як і відповідне обладнання.

Досліджувались наступні сценарії передавання та скасування ненавмисного ЦВВ УКХ радіостанцією SAILOR 6222 VHF DSC:

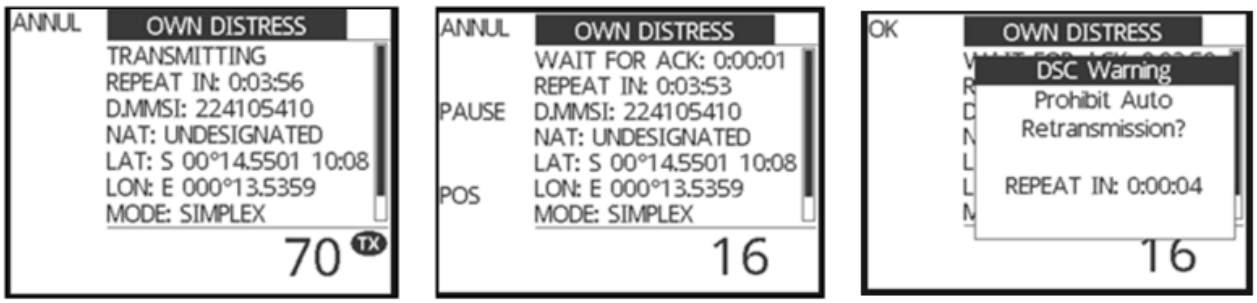
1) Виклик лиха на каналі 70;

2) Виклик лиха та його скасування програмованою кнопкою ANNUL;

3) Виклик лиха та його скасування шляхом вимкнення – увімкнення радіостанції (off – on).

Сценарій 1).

Зображення екрану радіостанції наведені на рис. 1.



а) б) в)

Рисунок 1 – УКХ радіостанція, що передає лихо: а) передача оповіщення про лихо; б) очікування підтвердження; в) у разі відсутності підтвердження повторна відправка лиха/або заборона повторного передавання кнопкою О

Після ініціювання виклику лиха кнопкою DISTRESS радіостанція переходить в режим очікування підтвердження від берегової станції. За сценарієм підтвердження не було. Повторне передавання лиха може бути через 3,5 – 4,5 хвилини з випадковою затримкою в цьому інтервалі часу. Радіостанція запрошує підтвердження повторного виклику. Можлива заборона (Prohibit) повторного виклику (Рис. 1 в) програмованою кнопкою ОК. В цьому випадку радіостанція передає виклик само-скасування. Інакше виклик лиха буде повторений. Сценарій 1) може виникнути в районах А2, А3, А4, де неможливий УКХ зв'язок з береговими станціями.

Сценарій 2).

Дії вахтового помічника для скасування помилкового виклику лиха у всіх діапазонах наземного зв'язку УКХ, ПХ, КХ однакові і складаються з двох кроків:

1. Скасування за допомогою ЦВВ, якщо апаратура дозволяє це зробити [1].

2. Голосове скасування на відповідному радіотелефонному каналі (каналах).

Такий порядок введений ще з 2009 року, коли з'явилась 13-та редакція Рекомендації ITU-R M.493-13 (10/2009) Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service. У наступній редакції 2015 року з'явився термін «Операція само-скасування у разі лиха» (Distress self-cancel operation).

ЦВВ само-скасування означає передачу підтвердження свого же виклику лиха замість берегової станції, якщо вона ще не встигла зробити підтвердження. Берегові станції можуть затримувати підтвердження виклику лика на час до 2 ¾ хвилини від його отримання. Але, якщо берегова станція вже зробила підтвердження, то само-скасування буде неможливим.

Другим кроком після ЦВВ передавання повідомлення само-скасування, тобто підтвердження судном свого же виклику лиха замість берегової станції, має бути радіотелефонне повідомлення про скасування виклику, яке робиться у відповідних частотних піддіапазонах, де був зроблений виклик лиха.

Сучасні радіостанції застосовують автоматичні процедури для спрощення управління радіозв'язком. Якщо оператор для скасування помилкового лиха ініціює процедуру само-скасування, то підтвердження виклику лиха виконується автоматично в усіх частотних під діапазонах, де були зроблені виклики лика. Після ЦВВ скасування автоматично встановлюються радіотелефонні канали/частоти для здійснення голосового скасування. В радіостанціях SAILOR серії 6000 процедура скасування запускається програмованою кнопкою ANNUL як в УКХ так і в ПХ/КХ діапазонах з блоку управління радіостанцією, якщо ЦВВ підтвердження з боку берегової станції ще не було отримане.

Сценарій 3).

У сценарії 3) аналізується процедура скасування виклику лиха шляхом off – on живлення радіостанції. Доцільність такого аналізу пояснюється зміною формулювання процедури скасування лиха за Рекомендацією 349 у версії 2024 року.

Всесвітня радіоконференція поспіль у 2019 і 2023 роках (WRC-2019 & WRC-2023) «враховуючи, що передача та ретрансляція хибних сигналів лиха є значною проблемою в ГМЗЛБ», закликала національні адміністрації:

- вжити всіх необхідних заходів для уникнення хибних сповіщень про лихо та мінімізації непотрібного навантаження на рятувальні організації та

- заохочувати правильне використання обладнання ГМЗЛБ, приділяючи особливу увагу належному навчанню.

Процедура скасування в УКХ, ПХ, КХ діапазонах сформульована таким чином [3, 4]:

RESOLUTION 349 (REV.WRC-19)

1) Reset the equipment immediately;

2) If the DSC equipment is capable of cancellation, cancel the alert in accordance with the most recent version of Recommendation ITU-R M.493;

3) Set to channel 16; and

4) Transmit a broadcast message to "All Stations" giving the ship's name, call sign and maritime mobile service identity (MMSI), and cancel the false distress alert.

RESOLUTION 349 (REV.WRC-23)

1) Follow the instructions on the radio screen, if applicable, or Switch off and switch on after 10 seconds, and follow the instructions on the radio screen, if applicable;

2) If the digital selective-calling (DSC) equipment is capable of cancellation, start the distress self-cancel operation in accordance with the most recent version of Recommendation ITU-R M.493;

3) Set to channel 16; and

4) Transmit a broadcast message to "All Stations" giving the ship's name, call sign and maritime mobile service identity (MMSI), and cancel the false distress alert.

По суті обидві процедури скасування у версіях WRC-2019 і WRC-2023 відрізняються тільки формулюванням першого пункту:

WRC-2019	1) Reset the equipment immediately;
WRC-2023	1) Follow the instructions on the radio screen, if applicable, or Switch off and switch on after 10 seconds, and follow the instructions on the radio screen, if applicable.

Операція Reset (Перезавантаження) у версії WRC-2019 замінена на off – on (Вимкнути – Увімкнути) операцію. На рис. 2 наведені зображення радіостанції для сценарію 3 (off – on).

а) б) в)

Рисунок 2 – УКХ радіостанція що передає лихо: а) передача оповіщення про лихо; б) вимкнення радіостанції; в) увімкнення радіостанції, попереджувальне вікно з пропозицією продовжити або скасувати оповіщення про лихо

Після увімкнення радіостанції з'являється попередження про можливість автоматичного повторення викликів лиха (AUTO-RESUME), або припинення процедури передавання лиха (QUIT SENDING DISTRESS STATE). Подовження процедури лиха здійснюється натисканням кнопки OK, або за таймером. У разі натискання QUIT здійснюється завершення процедури лиха. Важливо, що при цьому передавання виклику само-підтвердження не відбувається взагалі.

Висновки

1. Резолюція WRC-2023 [4] викликає певні сумніви через застосування процедури off – on, оскільки у разі вимикання радіостанції втрачається можливість передавання виклику само-скасування, хоча радіостанція здатна (Capable) це зробити. Пропозиція "Follow the instructions on the radio screen, if applicable," дійсно дозволяє зробити самоскасування кнопкою ANNUL, але альтернатива (or) у вигляді "Switch off and switch on after 10 seconds" не є рівноцінною першої пропозиції тому що не дозволяє зробити самоскасування.

2. Теоретичну і тренажерну підготовку з ГМЗЛБ треба здійснювати таким чином, щоб курсант розумів сам принцип проведення процедури скасування хибного виклику лиха, а не механічно слідкував узагальненим рекомендаціям.

3. Вахтовий помічник має бути знайомий з функціональними особливостями радіоапаратури, щоб у критичній ситуації обмеженого часу не допустити помилок в управлінні апаратурою.

ЛІТЕРАТУРА

1. ITU-R. (2023). Recommendation M.493-16. Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service.

2. RESOLUTION MSC.514(105) (2022) GUIDELINES FOR THE AVOIDANCE OF FALSE DISTRESS ALERTS

3. RESOLUTION 349 (REV.WRC-19) (2019). Operational procedures for cancelling false distress alerts in the Global Maritime Distress and Safety System.

4. RESOLUTION 349 (REV.WRC-23) (2023). Operational procedures for cancelling false distress alerts in the global maritime distress and safety system.

ЦИФРОВА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ NAVDAT ЯК ЕЛЕМЕНТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГМЗЛБ

Купровський В.І., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0009-0002-7267-3952
Національний університет «Одеська морська академія», Україна

Анотація: *розглянуто один із напрямків модернізації ГМЗЛБ, що здійснюється в рамках проекту е-навігація, – впровадження цифрової широкосмугової системи передачі даних NAVDAT. Виявлено передумови впровадження NAVDAT та її місце в системі ГМЗЛБ. Зроблене порівняння функціональних можливостей NAVDAT з системою NAVTEX.*

Ключові слова*: е-навігація, мережа передачі даних, безпека судноплавства, цифрові технології, інформація з безпеки, інформаційні системи, інформаційне середовище, стандарти кібербезпеки, цифрові сервіси*

NAVDAT DIGITAL DATA TRANSMISSION SYSTEM AS AN ELEMENT OF GMDSS MODERNIZATION

Kuprovskyi V., Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0009-0002-7267-3952
National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

Abstract: *one of the directions of modernization of the GMDSS, which is carried out within the framework of the e-navigation project, is considered, – the implementation of the digital broadband data system NAVDAT. The prerequisites for the implementation of NAVDAT and its place in the GMDSS system are identified. A comparison of the functional capabilities of NAVDAT with the NAVTEX system is made.*

Key-words: *e-Navigation, data network, safety navigation, digital technologies, safety information, information systems, information environment, cybersecurity standards, digital services*

Вступ. Технічний прогрес у галузі електроніки, радіозв'язку та інформаційних технологій створює передумови для модифікації обладнання та систем, що використовуються на морських суднах. Сьогодні ця робота активно проводиться в рамках проекту е-навігація, координатором якого є Підкомітет з безпеки мореплавства, зв'язку, пошуку та рятування (Sub-Committee on Safety of Navigation, Communication and Search and Rescue – NCSR) [1]. З 2016 року було розпочато роботи з реалізації проекту модернізації ГМЗЛБ [2,3], одним із напрямків якого є розробка і впровадження цифрових широкосмугових наземних мереж для передачі даних.

Актуальність досліджень. Одним із ключових елементів електронної навігації є мережа передачі даних у наземних каналах зв'язку, заснована на нових для морського радіозв'язку принципах. З розвитком цифрових технологій та зростанням потреби у швидкісному й надійному обміні навігаційною та метеорологічною інформацією виникла необхідність модернізації традиційних засобів морського зв'язку. Сучасні виклики навігаційної безпеки, організації та проведення пошуково-рятувальних операцій (SAR), передачі навігаційної інформації з безпеки мореплавства (MSI) все більше вимагають переходу від аналогових до цифрових технологій. Цифрова широкосмугова система передачі даних NAVDAT (Navigational Data) є принципово новим технічним рішенням, яка іде на заміну попередній системі NAVTEX. Використання цієї технології дозволяє значно розширити обсяг даних, що передаються, збільшити швидкість їх оновлення та забезпечити більш достатню інтеграцію із сучасними судновими інформаційними системами, зокрема ECDIS.

Постановка задачі. Система NAVDAT виникла як відповідь на потреби сучасного мореплавства та стандарти е-навігації у більш ефективному, надійному та швидкому спо-

собі передачі морської інформації, включаючи навігаційні попередження, прогнози погоди, інформацію з безпеки судноплавства та інші повідомлення в рамках ГМЗЛБ. З розвитком цифрових технологій та потребою в інтеграції графічної і мультимедійної інформації в рамках цифрової навігації, зокрема для підтримки електронних навігаційних карт (ENC), з'явилася потреба у новому, більш прогресивному рішенні, яким стала система NAVDAT і яка розглядається сьогодні як реальна передумова для заміни або доповнення існуючих систем, зокрема NAVTEX

Результати досліджень. Історія розвитку системи NAVDAT тісно пов'язана з еволюцією ГМЗЛБ. Протягом багатьох років для розповсюдження інформації з безпеки мореплавства в наземних каналах зв'язку використовувалась система NAVTEX, яка функціонує на частотах 518 кГц, 490 кГц та 4209,5 кГц. Незважаючи на її високу надійність і простоту, система має суттєві обмеження щодо пропускної здатності та формату повідомлень. Швидкість передачі становить приблизно 100 біт/с, що відповідало вимогам минулого століття, але виявилось недостатнім в сучасних умовах. NAVTEX може передавати лише в форматі ASCII, що створює серйозні проблеми через неможливість передачі графічних матеріалів (метеокарти, льодові карти, схеми суднових ходів) та відсутність підтримки стандартних морських цифрових форматів (S-57, S-100). Однією з найбільш слабких сторін NAVTEX є повна відсутність механізмів підтвердження отримання важливих повідомлень, що створює серйозні ризики для морської безпеки.

В умовах дедалі складнішого інформаційного середовища, збільшення кількості даних, що мають критичне значення для безпечного управління судном, виникла потреба в технології, яка здатна забезпечити широкосмугову, надійну та стандартизовану передачу структурованої цифрової інформації у реальному часі.

У рамках цифрової трансформації ГМЗЛБ, NAVDAT виконує кілька стратегічних функцій [5]:

1. Інтеграція з іншими цифровими сервісами – NAVDAT підтримує автоматичну передачу повідомлень типу MSI (Maritime Safety Information) і SAR (Search and Rescue), дозволяючи гармонізувати інформаційні потоки з ECDIS, INS та іншими судновими системами.

2. Підвищення надійності інформаційного обміну – завдяки кодуванню, верифікації повідомлень і цифровим підписам, NAVDAT сприяє впровадженню стандартів кібербезпеки та мінімізує ризики помилок.

3. Покращення ступеня поінформованості екіпажу – система забезпечує подання графічної і текстової інформації в дружньому інтерфейсі, що полегшує сприйняття та аналіз даних.

4. Підтримка концепції е-навігація – NAVDAT є важливою складовою розвитку електронної навігації, оскільки забезпечує автоматизовану доставку релевантної інформації у потрібний час у потрібне місце.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика NAVDAT і NAVTEX

Критерій	NAVDAT	NAVTEX
Тип модуляції	OFDM(ортогональний мультиплекс з частотним поділом каналів)	F1B
Швидкість передачі	0.3 – 29 кбіт/с	100 біт/с
Смуга пропускання	До 10 кГц	Приблизно 300 Гц
Формати переданих даних	Структуровані дані: текст, растрові та векторні зображення, файли GRIB, S-100, XML	Лише ASCII-текст, лімітований обсягом (до ~500 слів)
Покриття (діапазон дії)	Від 100 до 400 морських миль (залежно від потужності і режиму передачі)	~200–400 морських миль (залежно від потужності та завад)

Потужність передавача	6–50 кВт PEP (пікова потужність)	0.75–1.5 кВт (постійна)
Тип кодування	QAM (Quadrature Amplitude Modulation), з кодами корекції помилок	Без корекції, простий формат тексту
Режим передачі	Пакетна, з багаторівневим кодуванням та розділенням контенту за темами	Послідовна передача одного типу повідомлень
Сумісність з e-Navigation	Повна підтримка, включно з автоматичним оновленням ECDIS	Обмежена
Гнучкість/розширення	Можливість налаштування під різні режими, адаптивна модуляція	Статичний протокол
Наявність спсобу підтвердження	Може бути реалізовано на рівні інтегрованої системи	Відсутнє
Автоматизація обробки	Повна, з розподілом повідомлень за типами та адресацією до відповідних систем	Відсутня, вся обробка – вручну
Протокол обміну	Визначається новими специфікаціями IHO, ITU-R M.2010	ITU-R M.540-2

Важливою перевагою NAVDAT є можливість динамічного перерозподілу частотних ресурсів залежно від умов поширення радіохвиль та навантаження мережі. На відміну від NAVTEX з його фіксованим розкладом передач та обмеженим набором частот, NAVDAT автоматично адаптується до змін у ефірі, вибираючи оптимальні параметри передачі. Це особливо важливо в умовах іоносферних збурень або при значному навантаженні на частоти.

Окремо варто відзначити підтримку NAVDAT сучасних стандартів кібербезпеки. На відміну від NAVTEX, який взагалі не має захисту від кібератак, NAVDAT реалізує механізми автентифікації повідомлень, шифрування конфіденційної інформації та захисту від несанкціонованого доступу. Це особливо важливо для передачі інформації, пов'язаної з безпекою судноплавства.

Порівняльні характеристики NAVDAT і NAVTEX [6] представлені в таблиці 1.

Аналіз технічних характеристик систем NAVDAT та NAVTEX свідчить про наявність фундаментальних відмінностей як у рівні технологічної складності, так і у функціональних можливостях. NAVDAT є сучасним рішенням, що враховує вимоги концепції е-навігації та орієнтоване на високошвидкісну передачу структурованої цифрової інформації різного типу: текст, графіка, метеодані, електронні карти. Система реалізує адаптивну цифрову модуляцію (OFDM), забезпечує кращу стійкість до завад, високу масштабованість, автоматизацію обробки повідомлень та сумісність з ECDIS. Це відкриває можливості для повної інтеграції NAVDAT у майбутню архітектуру ГМЗЛБ та цифрового морського простору загалом.

На рис.1 [2] представлена структура системи NAVDAT, яка складається із п’яти модулів: інформаційна підсистема, берегова мережа, береговий передавач, канал передачі та судновий приймач.

NAVDAT реалізує принципово новий підхід до організації морського зв'язку, використовуючи розподілену мережеву архітектуру, що дозволяє одночасно підключати кілька інформаційних провайдерів - гідрографічні служби, метеорологічні центри, рятувальні координаційні центри. Це суттєво відрізняється від централізованої моделі NAVTEX, де інформація проходить жорстку фільтрацію через координаційні центри.

Проведені тестові випробування системи NAVDAT, пілотні проекти в Китаї і Франції [7,8,9,10] підтвердили її високу ефективність, надійність та технічну готовність до впровадження в реальних морських умовах. Успішні експерименти в різних регіонах сві-

ту засвідчили, що NAVDAT здатна забезпечити масштабне покриття й інтеграцію з сучасними судновими навігаційними платформами, що є важливим кроком на шляху модернізації ГМЗЛБ і переходу до цифрової морської комунікації нового покоління.

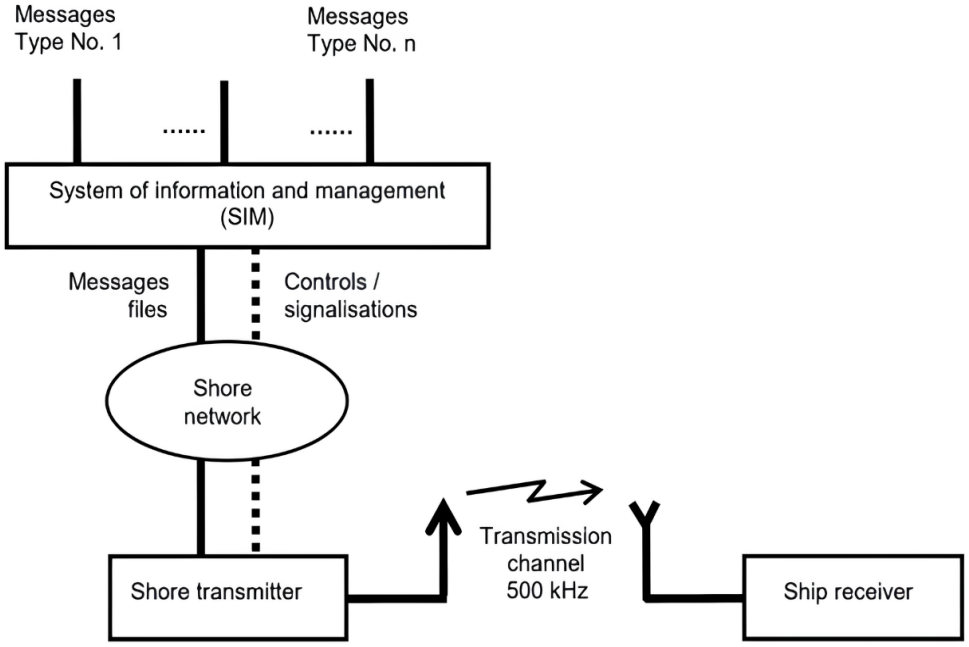


Рисунок 1 – Структурна схема системи NAVDAT

Висновки. Інтеграція системи NAVDAT у ГМЗЛБ є одним із ключових напрямів цифрової трансформації морської комунікаційної інфраструктури. Сьогодні цей процес триває у кількох паралельних напрямках:

нормативна інтеграція: через IMO, ITU, IHO та інші регуляторні органи відбувається розробка стандартів продуктивності, протоколів передачі, методик тестування та сертифікації;

технічна реалізація: постачальники обладнання (наприклад, Nautel-Navigation) розробляють промислові рішення для берегових станцій та суднових приймачів, здатних приймати, декодувати та передавати повідомлення у форматах S-100, XML, JPEG2000 тощо;

оперативна інтеграція: забезпечується взаємодія між провайдерами MSI, центрами порятунку, метеослужбами та портовими органами, що готують контент для трансляції через NAVDAT.

Сучасні виклики безпеки мореплавства, зростання обсягів морського трафіку, впровадження концепції е-навігації та нових стандартів електронної навігації, зокрема S-100, сформували об'єктивну необхідність у впровадженні нової технології передачі інформації з безпеки мореплавства, здатної забезпечити передачу не лише тексту, а й багатоформатних цифрових даних у реальному часі. У цьому контексті NAVDAT виступає як високоефективне доповнення, а у перспективі – як потенційна заміна для системи NAVTEX.

ЛІТЕРАТУРА

1. MSC 81/23/19, Report of the Maritime Safety Committee on its 81 session, International Maritime Organization (IMO), 2006

2. Korcz, K., Some Aspects of the Modernization Plan for the GMDSS, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 11, No. 1, 2017. – p.167-174.

3. 14th Meeting of World Wide Navigational Warning Service Sub-Committee (WWNWS14). GMDSS modernization and introduction to digital information to support SAR and MSI. NAVDAT. Geneva: 2022. – 36p.

4. IMO Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue (NCSR 10). Implementation Roadmap for NAVDAT into GMDSS Architecture.2023. https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/NCSR-10th-session.aspx

5. Nautel Nav. NAVDAT: Modernizing GMDSS – Technical Presentation. 2023. https://nautelnav.com

6. International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITU-R M.2010 – Characteristics of a Digital System, NAVDAT. Geneva, 2011. https://www.itu.int

7. IHO – International Hydrographic Organization. NAVDAT Demonstration and Test Results – WWNWS14 Working Paper. Brest, France, 2022. https://iho.int

8. MSC 102-INF.6. Main Performances and Applications of the Digital Navigational Data System (NAVDAT) – France Contribution. International Maritime Organization, 2020.

9. NCSR 7-INF.13. Test Measurements of NAVDAT under Real Conditions – China and France. IMO Document Portal, 2020.

10.IMO Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue, 7th session, Test measurements of NAVDAT system under real conditions, November 2019.

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУДНОВИХ ПРИЙМАЧІВ ГНСС

[1]**Шишкін О.В**., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-9781-9391
[2]**Коновець В.І.**, к.т.н., с.н.с.,
https://orcid.org/0000-0002-5354-4234
[1]**Пашенко О.Л.**, старший викладач
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
[1]**Харченко Р.Ю**., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-3051-7513
[1]Національний університет «Одеська морська академія»
[2]Науково-дослідницький центр «Державний океанаріум»

Анотація. *У роботі розглянуто створення та практичне застосування лабораторного стенду для дослідження суднових приймачів ГНСС. Система включає антену, приймач та персональний комп'ютер з програмним забезпеченням для реєстрації та аналізу NMEA-повідомлень. Детально проаналізовано структуру навігаційних даних, наведено приклади логів, а також результати тестування багаточастотних і мультисистемних навігаційних модулів. Показано можливості стенду щодо оцінювання точності позиціювання, якості супутникових сигналів, визначення впливу перешкод і перевірки роботи у диференційному режимі. Запропонований підхід може бути використаний у навчальному процесі для підготовки фахівців морської галузі та підвищення компетентності у сфері кібербезпеки навігаційних систем.*

Ключові слова: *ГНСС; NMEA-0183; лабораторний стенд; навігаційні дані; супутникова навігація; кіберризики у навігації; морські навігаційні системи.*

LABORATORY STAND FOR STUDYING MARINE GNSS RECEIVERS

[1]**Shyshkin O.V.,** Doctor of Technical Sciences, Professor
https://orcid.org/0000-0002-9781-9391
[2]**Konovets V.I.**, PhD, Senior Research Fellow
https://orcid.org/0000-0002-5354-4234
[1]**Pashenko O.L.,** M.Sc., Senior Lecturer
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
[1]**Kharchenko R. Yu.,** PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-3051-7513
[1]National university "Odesa maritime academy"
[2]Research Center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium"

Abstract. *The paper examines the development and practical application of a laboratory stand designed for studying marine GNSS receivers. The system includes an antenna, a receiver, and a personal computer equipped with software for recording and analyzing NMEA messages. The structure of navigation data is analyzed in detail, with examples of logs and results of testing multi-frequency and multi-system navigation modules provided. The stand's capabilities for assessing positioning accuracy, satellite signal quality, interference effects, and performance in differential modes are demonstrated. The proposed approach can be applied in the educational process for training maritime specialists and enhancing competence in the field of navigation system cybersecurity*

Keywords: *GNSS; NMEA-0183; laboratory stand; navigation data; satellite navigation; navigation cybersecurity risks; maritime navigation systems.*

Вступ. Приймачі Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) є основним інструментом сучасного судноплавства. Безперервне визначення координат та часової синхронізації за всесвітнім координованим часом (UTC) необхідне для функціонування суднових систем навігації та радіозв'язку (GMDSS). Техніко-експлуатаційні вимоги для суднових морських приймачів ГНСС визначені резолюцією IMO [1].

Сучасні морські приймачі ГНСС є багатоканальними і мультисистемними пристроями. Характеристики ГНСС морського призначення наведені у таблиці 1. Для підви-

щення точності приймачів ГНСС використовуються системи диференційної корекції на основі доповнюючи супутникових навігаційних систем (Satellite Based Augmented System, SBAS) Європейського покриття, Північне - Американського та Азійського регіонів.

Таблиця 1 – ГНСС, сигнали та частотні діапазони морського призначення

Система	Сигнал	Частота, МГц	Призначення
GPS	L1 C/A	1575.42	Основний цивільний сигнал для всіх морських приймачів GPS; підтримується у GMDSS, AIS, ECDIS
	L5	1176.45	Високоточний сигнал (Safety-of-Life); використовується у сучасних морських GNSS приймачах https://www.gps.gov/technical/icwg/
GLONASS	L1OF	≈1602.0 ± k×0.5625	Використовується у двосистемних GPS/GLONASS морських приймачах
	L3OC	1202.025	Новий цивільний сигнал для сумісності з Galileo/BeiDou у професійних навігаційних системах
Galileo	E1 (OS)	1575.42	Відкрита служба, сумісна з GPS L1; використовується у морських багатосистемних приймачах https://galileognss.eu/
	E5a	1176.45	Високоточний сигнал; застосовується у навігації підвищеної точності (ECDIS, VDES)
BeiDou	B1C	1575.42	Сумісний із GPS L1/E1; використовується у приймачах для міжнародного судноплавства
	B2a	1176.45	Високоточний сигнал для безпечної навігації http://en.beidou.gov.cn/
SBAS (EGNOS, WAAS, MSAS)	L1 / L5	1575.42 / 1176.45	Сигнали корекції для підвищення точності та надійності позиціонування в морських районах Європи, Північної Америки, Азії

В умовах масштабування кіберпорушень вільного сервісу супутникової навігації питання ефективної експлуатації приймачів ГНСС набувають особливого значення. Адекватне, своєчасне реагування на атаки порушення до сигналів ГНСС потребує поглиблених знань та практик суднової команди для підтримання морської безпеки.

Ціллю доповіді є представлення матеріалів щодо розробки та випробування дослідницького стенду приймачів ГНСС.

Основна частина

Дослідницький стенд в базовій конфігурації складається з антени, приймача GPS типу SPR-1400, персонального комп'ютеру з відповідним програмним забезпеченням (рис. 1).

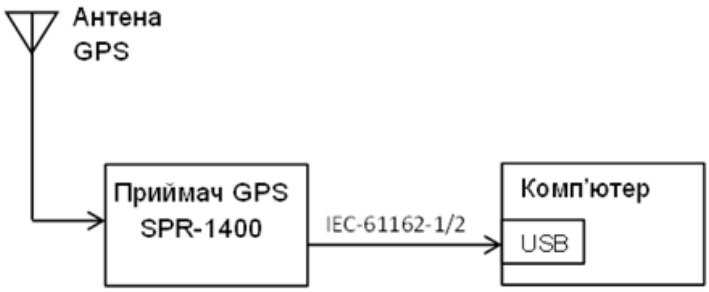
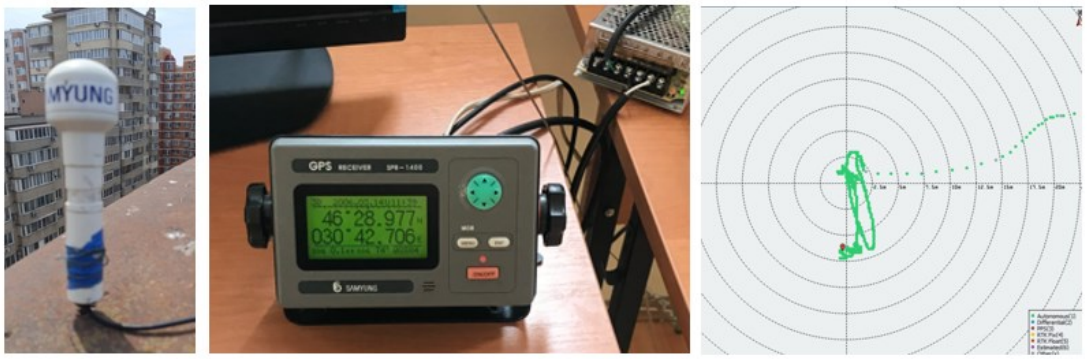


Рисунок 1 – Структурна схема дослідницького стенду

Підключення приймача GPS до комп'ютера здійснюється через USB порт. Передавання даних у напрямку приймач GPS – комп'ютер здійснюється за стандартним протоколом обміну даних IEC-61162-1/2 (NMEA-0183). Можливе підключення інших прий-

мачів замість SPR-1400 та антен (за наявністю) для проведення випробувань. Наприклад, антен з керованою діаграмою спрямованості (Controlled Receiver Pattern Antennaб CRPA).



а) б) в)

Рисунок 2 – Складові дослідницького стенду: а) антена, б) приймач GPS, в) зображення «мішень» обчислених координат на екрані комп'ютера

Дослідницький стенд дозволяє робити журнали (логи) прийнятих повідомлень приймача ГНСС, відображати параметри супутникових сигналів у різних формах, передавати та обробляти дані у середовищі MatLab.

Приклад декількох рядків журналу повідомлень приймача наведений нижче:

$GPDTM,W84,,0.0000,N,0.0000,E,0.0000,W84*5F
$GPGGA,092129.00,4628.9788,N,03042.7097,E,1,10,00.7,0067,M,0031,M,,*62
$GPGNS,092129.00,4628.9788,N,03042.7097,E,A,10,00.7,0067,0031,,*09
$GPGBS,092129.00,2.8,2.5,6.2,,,,*49
$GPGLL,4628.9788,N,03042.7097,E,092129.00,A,A*62
$GPRMC,092129.00,A,4628.9788,N,03042.7097,E,00.0,000.0,250425,,,A*61
$GPVTG,000.0,T,,,00.0,N,00.0,K,A*40
$GPZDA,092129,25,04,2025,-00,00*62
$GPDTM,W84,,0.0000,N,0.0000,E,0.0000,W84*5F
$GPGGA,092130.00,4628.9788,N,03042.7097,E,1,10,00.7,0067,M,0031,M,,*6A
$GPGNS,092130.00,4628.9788,N,03042.7097,E,A,10,00.7,0067,0031,,*01
$GPGBS,092130.00,2.8,2.5,6.2,,,,*41
$GPGLL,4628.9788,N,03042.7097,E,092130.00,A,A*6A

Формат речень NMEA передбачає використати першим символом знак $. Далі ідуть дві літери GP, які позначають джерело даних (Talker). Наступні 3 літери використані для назви речення. Для прикладу проаналізоване речення $GPRMC - Recommended Minimum Specific GNSS Data, яке забезпечує містить інформацію про координати, курс і час. Значення усіх полів даних наведені у таблиці 2.

NMEA Sentence: $GPRMC,092129.00,A,4628.9788,N,03042.7097,E,00.0,000.0,250425,,,A*61

Таблиця 2 – Аналіз речення $GPRMC

Поле No.	Значення	Розшифрування	Пояснення
1	092129.00	UTC Time	09:21:29.00 (UTC)
2	A	Status	A = Data valid (V = invalid)
3	4628.9788	Latitude	46°28.9788′ N
4	N	Latitude Hemisphere	North
5	03042.7097	Longitude	30°42.7097′ E
6	E	Longitude Hemisphere	East
7	00.0	Speed Over Ground (SOG)	0.0 knots (≈ 0.0 km/h)

8	000.0	Course Over Ground (COG)	000.0° (true)
9	250425	Date (ddmmyy)	25 April 2025
10	(empty)	Magnetic Variation	Not provided
11	(empty)	Magnetic Variation Direction	Not provided
12	A	Mode Indicator	A = Autonomous GNSS fix
Checksum	*61	Checksum	Valid (XOR of characters between $ and * = 61)

На рис. 2 (в) наведений результат спостереження поточних координат у режимі «Мішень». Кільця дальності побудовані з кроком радіуса 2,5 метра. Спостереження проводились 25 квітня 2025 р. Приймач видає координати кожну секунду, які позначаються зеленою крапкою (Автономний режим без диференційній корекції). Спостерігалось аномальне відхилення обчислених координат, яке могло бути наслідком повітряної тривоги, об'явленої під час проведення випробувань.

Стенд дозволяє досліджувати мультисистемні приймачі ГНСС. На рис. 3 представлені результати випробувань багатоканального мультисистемного приймача [3].

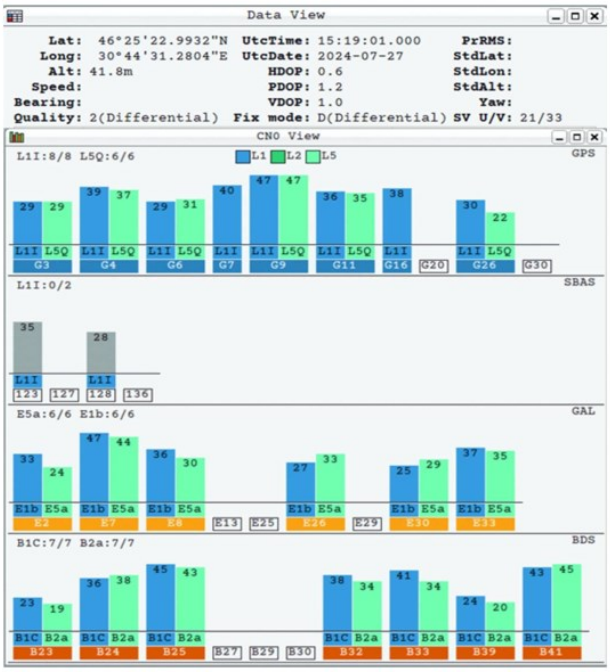


Рисунок 3 – Розшифрування навігаційних даних з виходу модуля u-blox NEO-F10N

Представлені стовпчикові графіки відображають реальні параметри роботи мультисистемного приймача ГНСС типу u-blox NEO-F10N професійного навігаційного класу, який одночасно приймає сигнали від кількох навігаційних систем (GPS, Galileo, BeiDou, SBAS).

Аналіз по секціях:

1. Загальні дані позиціювання (верхня частина).

- Lat/Long: 46°25′22.9932″N, 30°44′31.2804″E - позиція розташування приймача;
- Alt: 41.8 m — висота над рівнем моря;
- UtcTime / UtcDate: 15:19 UTC, 27 липня 2024 р.
- HDOP = 0.6, PDOP = 1.2, VDOP = 1.0 - дуже низькі значення розведення точності (Dilution of Precision), що свідчить про високу геометричну якість супутникової конфігурації - висока точність позиціювання.
- Quality: 2 (Differential) і Fix mode: D (Differential) — означає, що приймач працює у диференційному режимі (DGPS), тобто використовує поправки з референц-станції (наприклад, SBAS або RTK).

- SV U/V: 21/33 - з 33 супутників, видимих у полі зору, 21 використовується у розв'язанні (дуже добрий показник).

2. *CNO View (Carrier-to-Noise Ratio)*

- Кожен стовпчик відображає рівень сигналу–шуму (C/N₀) у дБ-Гц для кожного супутника та частоти.
- Колірна схема:

• (синій колір) L1/E1/B1C - базові частоти;
• (зелений колір) L5/E5a/B2a - сучасні широкосмугові сигнали (висока точність);
• (сірий або інший колір) - L2/E1b тощо.

GPS (L1/L5)

- Прийнято 8 супутників на L1, 6 на L5 — добрий рівень багочастотності.
- C/N₀ = 35–47 дБ-Гц, що свідчить про стабільний прийом, відсутність перешкод чи затінення.
- Використовується сигнал L5Q, що свідчить про підтримку сучасних сигналів GPS Block IIF/III.
- Наявність SBAS (GEO супутники G123–G136) → приймач отримує диференційні корекції.

Galileo (E1b/E5a)

- Активно приймаються 6+6 супутників (E2, E7, E8, E13, E25, E26, E29, E30, E33).
- C/N₀ до 47 дБ-Гц - висока якість сигналів.
- Наявність двох частот (E1b/E5a) дозволяє двочастотну корекцію іоносферної затримки.
- Це підтверджує високу точність (до дециметрів) навіть без RTK (Real Time Kinematic).

BeiDou (B1C/B2a)

- 7 супутників на B1C, 7 на B2a (B23–B41) - включає MEO і GEO супутники.
- Сильні сигнали (до 45 дБ-Гц) - ефективна видимість у східному регіоні Євразії.
- Підтримка нового покоління BDS-3 (B1C/B2a), що забезпечує сумісність із GPS L1/L5.

Висновки за результатами тесту наступні:

1. Приймач працює у диференційному режимі (DGNSS) - тобто застосовує корекції, можливо з EGNOS або локальної базової станції.
2. Багатосистемна і мультисистемна робота (GPS, Galileo, BeiDou, SBAS) гарантує високу надійність і точність.
3. Високі C/N₀ значення (35–47 дБ-Гц) свідчать про відсутність радіоперешкод, мультипасів або екранування.
4. DOP < 1.2 → відмінна геометрія супутникової конфігурації.
5. Координати та час стабільні, що підтверджує успішну калібровку і точність у межах 0.5 – 1 м (для DGNSS).

Висновки. Розроблений стенд дозволяє проводити дослідження приймачів та антен ГНСС. Може бути використаний для проведення лабораторних занять курсантів: магістрів судноводійній спеціалізації у дисципліні «Управління кіберризиками на морі» та бакалаврів електромеханічної спеціалізації у дисципліні «Суднові технічні засоби навігації та зовнішнього зв'язку».

ЛІТЕРАТУРА

1. RESOLUTION MSC.401(95). (2015) PERFORMANCE STANDARDS FOR MULTI-SYSTEM SHIPBORNE RADIONAVIGATION RECEIVERS.

2. Resolution A.1046(27). (2011). WORLDWIDE RADIONAVIGATION SYSTEM.

3. Hlynianiuk, V., Konovets, V., Kuzmenko, V., Pleshko, E., Rudenskyi, R., Shyshkin, O. (2025). Improving the measurement efficiency of marine ship-borne receivers of global navigation satellite systems. Technology audit and production reserves, Volume 4, Issue 1 (84), pp. 34-39. DOI: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337041

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ СПОВІЩЕНЬ (Return Link Service) В АВАРІЙНИХ РАДІОБУЯХ (EPIRB)

Пашенко О.Л., старший викладач
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Технологія підтвердження сповіщень (Return Link Service, RLS) — це нова функція в системі COSPAS-SARSAT, яка забезпечує передачу підтвердження безпосередньо на активований аварійний радіобуй EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon). Коли аварійний буй, що підтримує функцію RLS, активується і сигнал про лихо на частоті 406 МГц приймається та обробляється мережею COSPAS-SARSAT, коротке RLS повідомлення передається на EPIRB через супутникове сузір'я Galileo. Після цього буй сигналізує про отримання підтвердження. Таким чином, RLS повідомлення означає, що сигнал лиха був отриманий та ідентифікований службами пошуку і рятування. У цій доповіді пояснюється принцип роботи RLS, її технічна реалізація через супутники Galileo MEOSAR та наведений перелік сучасних моделей EPIRB із підтримкою RLS.*

Ключові слова: *АРБ, Коспас-Сарсат, технологія підтвердження сповіщень, Галілео.*

RETURN LINK SERVICE TECHNOLOGY IN EMERGENCY POSITION INDICATING RADIO BEACONS (EPIRB)

Pashenko O.L., M.Sc., senior lecturer
https://orcid.org/0000-0002-0462-0130
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *The Return Link Service (RLS) is a new feature of the COSPAS-SARSAT system that provides a confirmation signal directly to the activated EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon). When an RLS-capable beacon is triggered and its 406 MHz distress message is received and processed by the COSPAS-SARSAT network, a short Return Link Message is sent via the Galileo satellite constellation back to the beacon. The beacon indicates reception. Thus, RLS reassures the user that the distress signal has been received and localized by search-and-rescue authorities. This report explains how RLS works, its technical implementation via Galileo MEOSAR satellites and lists modern EPIRB models with RLS.*

Keywords: *EPIRB, RLS, COSPAS-SARSAT, Galileo.*

Невід'ємним елементом міжнародної системи COSPAS-SARSAT є морські аварійні радіобуї (EPIRB – Emergency Position Indicating Radio Beacon), що працюють на частоті 406 МГц і забезпечують швидке виявлення суден у разі надзвичайної ситуації. Сучасна інфраструктура COSPAS-SARSAT охоплює не лише користувацький, а й наземний та космічний сегменти. Останній представлений супутниками кількох орбітальних рівнів – низькоорбітальні (LEO), геостаціонарні (GEO) та середньоорбітальні (MEO) супутники. З 2016 року Європейський Союз бере участь в роботі системи через програму Galileo Search and Rescue (SAR/Galileo) на базі середньоорбітальних супутників, що входить до складу глобальної навігаційної системи Galileo [1].

Космічний сегмент Galileo складається з сузір'я типу Walker 24/3/1 – 24 супутників на середній навколоземній орбіті та резервних апаратів, розташованих у трьох орбітальних площинах. Вузли їхніх висхідних гілок рівномірно розподілені з інтервалом у 120 градусів, а самі орбіти нахилені під кутом 56 градусів до екватора. Супутники здійснюють оберт навколо Землі приблизно за 14 годин на висоті 23 222 км, забезпечуючи видимість щонайменше чотирьох супутників у будь-якій точці земної поверхні (з урахуванням місцевого рельєфу та затінення) [2].

Супутники системи Galileo, окрім навігаційного навантаження, оснащені ретрансляторами сигналів лиха SAR Repeater (SARR) на підтримку системи COSPAS-SARSAT MEOSAR. Обладнання Galileo SARR складається з передавачів «bent-pipe SAR Transponders» та антен прийому й передачі SAR. Вони приймають сигнали лиха на частоті 406 МГц, що відповідають стандартам COSPAS-SARSAT, і повторно передають їх у L діапазоні на частоті 1544,1 МГц без обробки, зберігання даних або демодуляції на борту – до MEOLUT, які перебувають у зоні видимості, глобально. Ключова функція Galileo SARR забезпечити передачу сигналу лиха (FLS – Forward Link Service) та підтвердження сигналу лиха (RLS – Return Link Service) безпосередньо на аварійний радіобуй, інформуючи постраждалого про успішне виявлення й оброблення сигналу. Передача RLS здійснюється через навігаційний сигнал Galileo E1. На момент написання доповіді 28 супутників Galileo підтримували RLS, два з яких не мають корисного навантаження, ще два виведені з експлуатації в 2017 та 2023 роках [3].

Маршрут RLM формується через послідовність взаємодій між різними сегментами космічної та наземної інфраструктури. Процес починається з моменту, коли RLS-сумісний EPIRB передає Forward Link Alert Message (FLAM) на частоті 406 МГц, який містить запит на підтвердження. Супутники Galileo, оснащені ретрансляторами SARR, приймають цей сигнал і негайно ретранслюють його у L-діапазоні (1544,1 МГц) до наземних станцій EU MEOLUT, які виконують виявлення та визначення координат аварійного радіобуя.

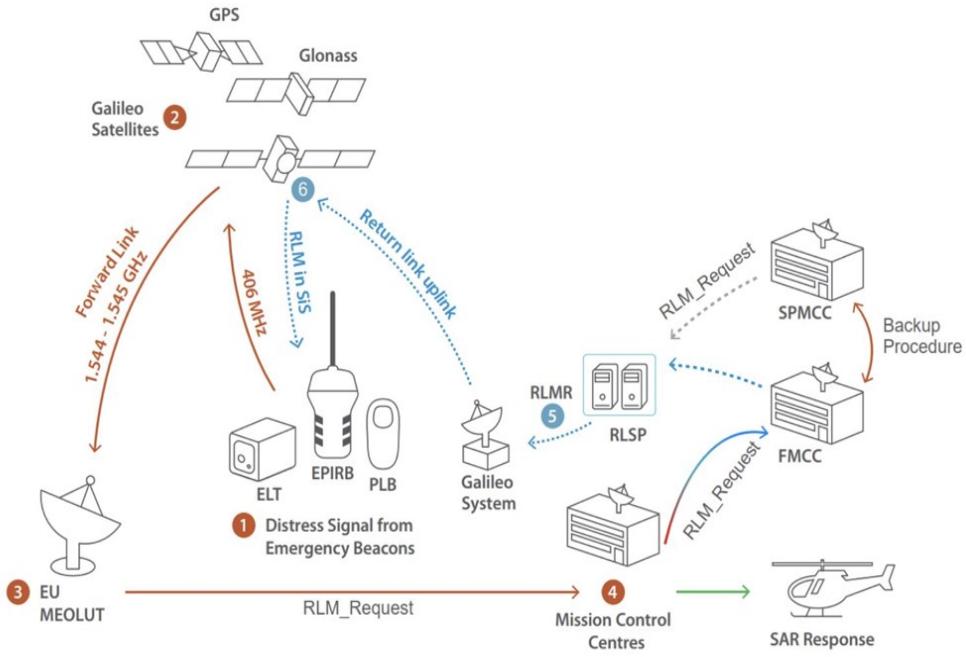


Рисунок 1 – Маршрутизація повідомлень RLM технології RLS

Отримані дані передаються до центру управління місією (MCC – Mission Control Centre), що відповідає за регіон, де зафіксовано сигнал лиха. MCC формує запит на підтвердження (RLM Request) і надсилає його до одного з національних центрів – Французького центру управління місією (FMCC – French Mission Control Centre), що є основним або, у резервному режимі, Іспанському центру управління місією (SPMCC – Spanish Mission Control Centre).

Далі запит передається до Постачальника послуг зворотного каналу (RLSP – Return Link Service Provider), який розміщений у Сервісному центрі SAR/Galileo (SGSC – SAR/Galileo Service Centre) у Тулузі. Це єдиний елемент що поєднує системи Galileo та COSPAS-SARSAT. Тут формується RLM Transmission Request (RLMR) – запит на завантаження повідомлення до супутників. RLM транслюється через два супутники Galileo одночасно на частоті 1575,42 МГц (сигнал Galileo E1), щоб підвищити ймовірність прийо-

му. Тобто по факту система Galileo вбудовує підтвердження в навігаційний сигнал. Отримавши це повідомлення, аварійний радіобуй декодує його і тим самим отримує підтвердження, що його сигнал був виявлений, а координати – визначені. Система Galileo гарантує доставку RLS повідомлення в межах 15 хвилин в більше ніж 99% випадків [2].

Технологію RLS підтримують насамперед нові моделі аварійних радіобуїв (EPIRB/PLB/ELT)[4], а саме 2-е покоління радіобуїв, що відповідають оновленим стандартам COSPAS-SARSAT з RLS-протоколом. Обов'язковим є наявність Galileo-приймача. Передача RLS здійснюється на безкоштовній основі. Є деякі обмеження зі сторони адміністрацій країн на продаж та використання аварійних радіобуїв [5].

Рисунок 2 – EPIRB Ocean Signal rescue ME EPIRB2 Pro

На ринку EPIRB з підтримкою RLS представлені наступними моделями: ACR Electronics GlobalFix V6 [6], Orolia / Kannad SafePro+ AIS RLS [7], McMurdo SmartFind AIS RLS, Ocean Signal rescueME EPIRB2 Pro і EPIRB3. У всі ці моделі вбудовані GNSS-приймачі здатні працювати з супутниками Galileo та GPS, що забезпечує точне визначення місцезнаходження буя. Реалізація функції RLS здійснюється здебільшого через світлову індикацію (синє миготіння LED) або, у деяких моделях, через інформацію на дисплеї буя, що дозволяє користувачу переконатися, що сигнал лиха був успішно прийнятий і місце його знаходження визначене. Додатково, деякі моделі, наприклад SafePro+ AIS RLS, інтегрують AIS для локалізації. Основна відмінність від стандартних EPIRB полягає у зворотному каналі зв'язку, який забезпечує психологічний ефект для постраждалого, а також підвищує ефективність і контроль за роботою системи пошуку та рятування.

Висновки. Таким чином, технологія RLS демонструє складну, але злагоджену взаємодію між елементами систем COSPAS-SARSAT і Galileo. Ця технологія істотно підвищує ефективність рятувальних операцій, адже забезпечує не лише передачу сигналу лиха, а й психологічно важливе повідомлення про те, що рятувальна операція розпочинається.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Union, Galileo Search and Rescue (SAR) Galileo Service, [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/search-and-rescue-sar-galileo-service

2. European Union, Galileo Search and Rescue Service Definition Document (SAR SDD), Issue 3.0, October 2024, Programme of the European Union. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-SAR-SDD.pdf

3. European Union, «SAR/Galileo Satellites Information», European GNSS Service Centre (GSC), [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/sar-information

4. ACR Artex, *"Galileo Return Link Service (RLS) / MEOSAR"*, [Online]. Available: https://www.acrartex.com/news/galileo-return-link-service-rls-meosar/?srsltid=AfmB OoqCWSzoonj-hS8GIfeJ7I8G_O39eFFFt6cmIwj4vzoc3yj8tLV2

5. COSPAS-SARSAT, "RLS-enabled beacon purchase," [Online]. Available: https://www. Cospas -sarsat.int/en/beacon-ownership/rls-enabled-beacon-purchase

6. ACR Artex, *"GlobalFix V6 EPIRB with Return Link Service and Mobile App"*, [Online]. Available: https://www.acrartex.com/products/globalfix-v6-epirb/

7. Kannad Marine, "SAFEPRO+ AIS EPIRB," [Online]. Available: https://www.themysgroup. com/ public/files/6408bcc4b82d1.pdf

8. Ocean Signal Ltd., "rescueME EPIRB2 Pro", [Online]. Available: https://www.oceansignal. Com / products/epirb2-pro/

ОГЛЯД ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН

Борса Є. В. здобувач другого рівня вищої освіти
https://orcid.org/0009-0004-4880-8225
Михайлов С.А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Розвиток автономних суден починає створювати нові виклики для інформаційної безпеки. Людина, як остання ланка у підтриманні безпеки на борту замінюється цифровими технологіями, що значно збільшує вразливість до різного роду кібератак. У роботі проведено огляд сучасних загроз для безекіпажних суден та проаналізовано актуальні міжнародні вимоги до їх кіберзахисту. Було запропоновано класифікацію засобів забезпечення інформаційної безпеки автономних суден за групами.*

Ключові слова: *автономні судна; інформаційна безпека; кібербезпека; кіберзагрози; IMO; IACS UR E26/E27; засоби захисту; OT-системи; сенсори; моніторинг.*

OVERVIEW OF INFORMATION SECURITY TOOLS FOR AUTONOMOUS VESSELS

Borsa Y. V. second-level graduate of higher education
https://orcid.org/0009-0004-4880-8225
Mykhailov S. A., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
National University "Odesa Maritime Academy"

Abstract*: The development of autonomous vessels is beginning to create new challenges for information security. The person, as the last link in maintaining security on board, is being replaced by digital technologies, which significantly increases vulnerability to various types of cyberattacks. The paper reviews modern threats to unmanned vessels and analyzes current international requirements for their cyber protection. A classification of means of ensuring information security of autonomous vessels by groups was proposed.*

Keywords: *autonomous vessels; information security; cybersecurity; cyber threats; IMO; IACS UR E26/E27; protection; OT systems; sensors; monitoring.*

Останні роки ми невпинно рухаємося до нової ери вантажних перевезень - автономних суден, здатних плавати без постійного екіпажу на борту.

Такі проекти, як безекіпажне судно Yara Birkeland в Норвегії, демонструють потенційні переваги автономних технологій - підвищення ефективності та зниження витрат [1]. Однак водночас повна цифровізація створює численні вразливості для інформаційної безпеки. Атаки на навігаційні та управляючі системи [1] можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Небезпека підсилюється тим що, морська індустрія приблизно на 20 років позаду споріднених галузей за впровадженням кіберзахисту [2]. З огляду на це, автономні судна стануть пріоритетними цілями для кіберзлочинців [2].

Тож для вирішення цієї проблеми важливо врахувати:

- Архітектурні особливості автономних суден
- Актуальні кіберзагрози
- Нормативні вимоги та стандарти
- Засоби захисту

Аналіз архітектури автономних суден

Архітектура автономного судна характеризується високим рівнем інтеграції систем прийняття рішень різного рівня та датчиків [3]:

- Система ситуаційної обізнаності, яка включає радари, лідари, камери, гіростабілізовані інфрачервоні системи, а також навігаційні приймачі GNSS (GPS) та автоматична ідентифікаційна система (AIS)
- Система прийняття рішень, яка **аналізує дані сенсорів та приймає рішення щодо навігації і маневрування**
- Система виконання, яка включає засоби керування рушійною установкою, енергетичною системою та допоміжними механізмами

Важливо підкреслити, що всі компоненти автономного судна тісно взаємопов'язані та обмінюються даними в реальному часі. Перевагою такої архітектури є висока автоматизація та оптимізація процесів, але недоліком стає підвищена залежність від кібернетичної складової, що робить судно вразливим до цілеспрямованих атак.

Сучасні загрози для автономних суден. Сучасні кіберзагрози для автономних суден охоплюють широкий спектр, від радіоелектронного впливу на навігаційні сигнали до проникнення в корабельні мережі через шкідливе програмне забезпечення.

- **Атаки на навігаційні сигнали (RF-атаки).** Автономні судна залежні від GNSS для визначення координат, тому глушіння або спуфінг сигналів GPS становить серйозну загрозу. Так, н 2017 році не Чорному морі був зафіксований масовий випадок, коли понад 20 суден одночасно одержували помилкові координати: їх GPS-прилади показували положення глибоко на суші за десятки миль від реального місця знаходження [4].
- **Обман та виведення з ладу сенсорів.** Може відбуватися як шляхом фізичного впливу, так і шляхім підробки даних. Так, користуючись правилом COLREG 14, у 97 000 симуляцій «умовні хакери» змусили судно маневрувати за заданою траєкторією. Користуючись правилом запобігання зіткнень, «хакери» вставляли радіолокаційні сигнали та видаляли існуючі [2]. Інший приклад – злам ECDIS ізраїльською компанією Naval Dome. «Ключові параметри судна – положення, курс, глибина та швидкість – маніпулювалися таким чином, щоб навігаційна картина мала сенс і не викликала підозр», – сказав Асаф Шефі [5].
- **Перехоплення і модифікація каналів зв'язку.** В 2022 році група хакерів з Ірану, відома як Lab Dookhtegan, перехопила супутниковий канал зв'язку і вивела з ладу комунікації 60 суден, які оперувалися Іранськими компаніями NITC та IRISL і на які були накладені санкції США. Успіх був одержаний шляхом видалення основних даних, лишивши судна «сліпими» [6].
- **Атаки на бортові ОТ-системи**. Операційні технології (ОТ) судна – системи керування двигунами, генераторами, насосами – зазнають тих самих загроз, що й промислові системи на суші. Згадана вже ізраїльська компанія Naval Dome підключилася до MCS судна та вразила баластну систему. На екрані все було добре, однак в реальності насоси зупинили роботу [5].
- **Атаки на штучний розум.** Машинне навчання може бути обдурене цілеспрямованими впливами: від маніпуляцій з вхідними даними до впровадження сторонніх алгоритмів. Олександр Вуді стверджує, що можна вставити «кілька пікселів» — невидимих для людського ока, — які «змусять штучний розум неправильно ідентифікувати знак» [7].

З 2014 по 2024 демонструється тривожна тенденція неухильного зростання кіберінцидентів. Кібератаками піддався різноманітний спектр систем та організацій, такі як навігація, портова інфраструктура, судноплавні компанії, морські органи влади, державні установи, суднобудівники та підрядники оборонного призначення [8], [9].

Аналіз міжнародних вимог з кібербезпеки. Зростання кіберзагроз у морській індустрії спонукало міжнародні органи та класифікаційні товариства розробити перші регулятивні акти та рекомендації щодо забезпечення кібербезпеки на судах.

У 2017 році IMO офіційно визнала, що кіберінциденти можуть суттєво підірвати безпеку судноплавства, і закликала судновласників інтегрувати управління кіберризиками до систем менеджменту безпеки (резолюція MSC.428(98)). Цією резолюцією IMO зобов'язала з 2021 року включати кіберризики до систем управління безпекою кожного судна [2]. Іншими словами, до моменту першого планового аудиту після 1 січня 2021 року компанії повинні були доповнити свої SMS процедурами щодо кібербезпеки (ідентифікація загроз, заходи захисту, плани реагування на інциденти).

Для автономних суден на рівні IMO наразі немає окремих правил щодо кібербезпеки. Вони підпадають під ті ж вимоги, що й інші.

Наразі IMO визначило 4 рівні автономності (від автоматизації окремих процесів до повної автономності без екіпажу) [2]. В рамках MSC 2021 визнається, що для рівнів 3 і 4 (віддалено керовані без екіпажу та повністю автономні судна) можуть знадобитися додаткові заходи.

Прямих окремих вимог, на рівні конвенцій, поки що немає, тому задовольняємося виключно рекомендаціями.

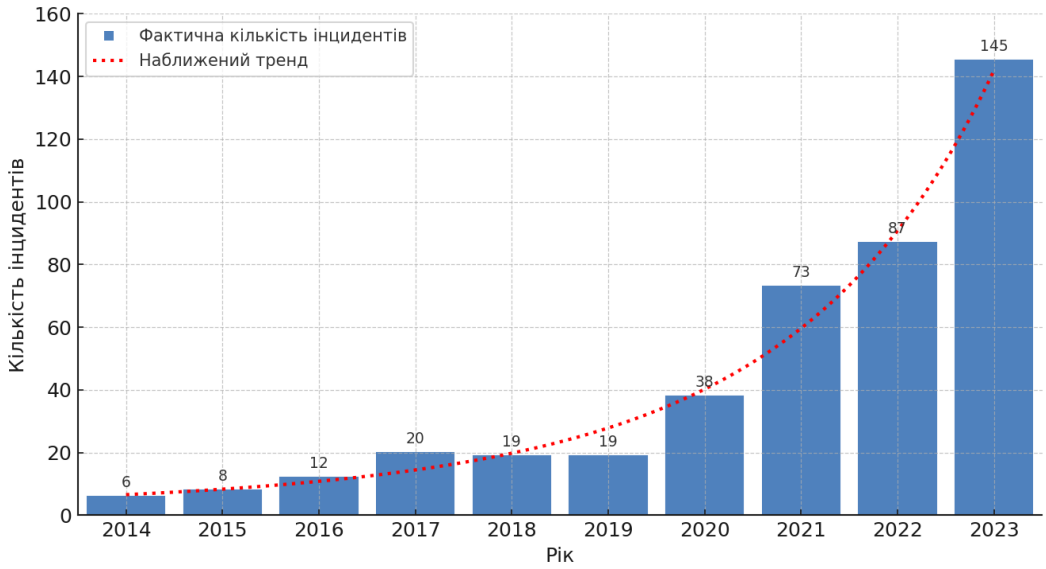


Рисунок 1 – Дані з бази MCAD

Однак значну роль у встановленні конкретних технічних вимог відіграють класифікаційні товариства, об'єднані в Міжнародну асоціацію класифікаційних товариств (IACS). У 2021 році було опубліковано два ключових документи: IACS UR E26 "Cyber Resilience of Ships" та UR E27 "Cyber Resilience of On-board Systems and Equipment" [10], які набувають обов'язкового характеру для нових суден із контрактом на побудову після 1 січня 2024 року

Перший документ встановлює вимоги до кіберзахищеності на рівні цілого судна (управління ризиками, архітектура мереж, наявність засобів захисту та відмовостійкості).

Другий документ конкретизує вимоги до бортового обладнання і систем (захист на рівні компонентів, безпечне програмне забезпечення, контроль доступу до систем навігації, зв'язку, енергетики тощо).

UR E26/E27 можна розглядати як перший галузевий стандарт кібербезпеки для суден. Він зобов'язує при проєктуванні й будівництві судна забезпечити ряд мінімальних кіберзахисних можливостей: зокрема, сегментування мережі на ізольовані зони, наявність брандмауерів між сегментами, автентифікацію користувачів для доступу до систем, інтеграцію засобів виявлення вторгнень (IDS) та аномалій у режимі реального часу, захист бездротових інтерфейсів, безпечне оновлення ПЗ, резервні копії даних тощо.

Попри те що вимоги IACS й піднімають планку кіберзахисту суден, але поки що прямо не враховують специфічних ризиків автономності, наразі видніються чіткі ознаки того, що розроблені вони для традиційних суден з екіпажем [3]. Дієві розробки будуть можливі лише після масового запуску та перших масштабних аварій.

В деяких юрисдикціях з'являються і національні стандарти: наприклад, у Великій Британії випущено регуляторне повідомлення UK Code of Practice: Cyber Security for Ships [11], а Морська та портова адміністрація Сінгапуру (MPA) інвестує у створення тестових полігонів на кшталт MariOT для перевірки рішень кібербезпеки для морського транспорту [12].

Класифікація засобів забезпечення ІБ автономних суден. Комплексний захист автономного судна вимагає багаторівневого підходу. Можна обґрунтовано виділити декілька груп засобів інформаційної безпеки, що мають застосовуватися до автономних суден. Кожна група відповідає певному аспекту захисту – від організаційних заходів до технічних рішень в самих системах.

▪ **Організаційні заходи**. Сюди відносяться політики, процедури та практики управління кібербезпекою, що впроваджуються судновласником і оператором флоту. Компанія повинна мати план реагування на інциденти: якщо автономне судно потрапляє під кібератаку, то відповідальність за судно на себе бере кризова група, яка переводить судно в безпечний режим та інформує відповідні органи.

▪ **Архітектурні засоби захисту.** Це заходи, що закладаються у проєктну архітектуру систем судна, роблячи її стійкішою до атак. Один із ключових принципів – сегментація мережі. Іншим важливим заходом є резервування. Автономне судно повинно мати дубльовані навігаційні сенсори. Важливим також є принцип розподілу довіри. Жодна підсистема не має повного контролю без можливості перевірки іншою. Рішення AI-модуля періодично можуть валідуватися простішими алгоритмами або оператором (при зв'язку), щоб виключити некоректні дії. Системи безпеки (аварійної зупинки, пожежогасіння) слід спроєктувати так, щоб вони могли працювати автономно навіть при порушеній мережі.

▪ **Засоби захисту сенсорів та даних спостереження.** Критично важливим є поєднання різного роду датчиків. Для цього слід впровадити алгоритми перевірки консистентності даних.

▪ **Засоби захисту OT-систем і виконавчих механізмів.** Всі обчислювальні пристрої мають бути захищені паролями, бажано з багатофакторною автентифікацією, навіть якщо до них доступ здійснюється лише всередині суднової мережі.

Висновок. Автономні судна обіцяють революцію в морських перевезеннях, проте разом з тим висувають безпрецедентні вимоги до забезпечення інформаційної безпеки. вже сьогодні суднобудівники та оператори повинні приділяти максимум уваги комплексному захисту – від політик управління ризиками до впровадження технічних бар'єрів і моніторингу. Наведена структура засобів інформаційної безпеки та аналіз поточного стану можуть бути у нагоді для зацікавлених сторін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shruthi. Autonomous Ship Cybersecurity: Unmanned Vessel Protection [Електронний ресурс]. — CodeSecure, 08.09.2025. — Режим доступу: https://codesecure.in/blogs/autonomous-ship-cybersecurity-unmanned-vessel-protection/

2. Fenton, A. J. Ships without crews: IMO and UK responses to cybersecurity, technology, law and regulation of maritime autonomous surface ships (MASS) [Text] / A. J. Fenton, I. Chapsos // Frontiers in Computer Science. – 2023. – V. 5. – Art. 1151188. – Doi: 10.3389/fcomp.2023.1151188. — Режим доступу: https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2023.1151188/full

3. Yoo, J. Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology [Text] / J. Yoo, Y. Jo // Sensors. – 2023. – V. 23, № 11. – Art. 5033. – Doi: 10.3390/s23115033. — Режим доступу: https:/www.mdpi.com/1424-8220/23/11/5033

4. Goward, D. Mass GPS Spoofing Attack in the Black Sea? [Електронний ресурс] / D. Goward // The Maritime Executive / Resilient Navigation and Timing Foundation (RNTF). — 11.07.2017. — Режим доступу: https://rntfnd.org/2017/07/12/mass-gps-spoofing-attack-in-the-black-sea-maritime-executive/

5. The Maritime Executive. Tests Show Ease of Hacking ECDIS, Radar and Machinery [Електронний ресурс] // The Maritime Executive. — 21.12.2017. — Режим доступу: https://www.maritime-executive.com/article/tests-show-ease-of-hacking-ecdis-radar-and-machinery

6. SecurityWeek News. In Other News: Iranian Ships Hacked, Verified Android Developers, AI Used in Attacks [Електронний ресурс] // SecurityWeek. — 29.08.2025. — Режим доступу: https://www.securityweek.com/in-other-news-iranian-ships-hacked-verified-android-developers-ai-used-in-attacks/

7. Woodie, A. Hacking AI: Exposing Vulnerabilities in Machine Learning [Електронний ресурс] / A. Woodie // Datanami. — 28.07.2020. — Режим доступу: https://www.datanami.com/2020/07/28/hacking-ai-exposing-vulnerabilities-in-machine-learning/

8. Li, M. Maritime Cybersecurity: A Comprehensive Review [Text] / M. Li, J. Zhou, S. Chattopadhyay, M. Goh // arXiv preprint arXiv:2409.11417 [Електронний ресурс]. — 2024. — 23 p. — Doi: 10.48550/arXiv.2409.11417. — Режим доступу: https://arxiv.org/abs/2409.11417

9. Maritime IT Security Research Group. MCAD – Maritime Cyber Attack Database [Електронний ресурс]. — NHL Stenden University of Applied Sciences, Netherlands. — Режим доступу: https://maritimecybersecurity.nl/

10. International Association of Classification Societies (IACS). Addressing Cyber Resilience of Ships (IACS UR E26 and E27 Press Release) [Електронний ресурс]. — London: IACS, 2023. — Режим доступу: https://iacs.org.uk/news/iacs-ur-e26-and-e27-press-release

11. Boyes, H. Code of Practice: Cyber Security for Ships [Text] / H. Boyes, R. Isbell. — London: Institution of Engineering and Technology; Department for Transport, 2017. — 75 p. — (IET Standards). — ISBN 978-1-78561-577-1. — Також доступно в електронній формі: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/64c929c0d8b1a71bd8b05e80/code-of-practice-cyber-security-for-ships.pdf

12. Maritime and Port Authority of Singapore (MPA). MPA Commissions MariOT Training Facility [Електронний ресурс]. — Singapore: MPA, 25.03.2025. — Режим доступу: https://www.mpa.gov.sg/media-centre/details/mpa-commissions-mariot-training-facility

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІБЕРСТІЙКОСТІ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АВТОНОМНИХ СУДЕН

Михайлов С.А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
Чуйко Я.І., студент
https://orcid.org/0009-0004-5696-4981
Національний Університет «Одеська Морська Академія»

Анотація: *У статті розглядається процес цифрової трансформації морської галузі та перехід до використання морських автономних надводних суден (MASS). Проводиться порівняльний аналіз кіберзагроз для традиційних суден з екіпажем та повністю автономних суден. Акцентується увага на зміні природи ризиків внаслідок усунення «людського фактора», що перетворює загрози з операційних на катастрофічні. Описуються нові вектори атак та їхні наслідки для безпеки мореплавства. Також висвітлюється роль нової регуляторної бази, зокрема Єдиних вимог IACS UR E26 та E27, у формуванні стандарту кіберстійкості як обов'язкової умови сучасної експлуатації суден.*

Ключові слова: *цифровізація судноплавства, автономні судна (MASS), кіберстійкість, IACS UR E26 та E27, вектори кібератак, людський фактор, морська кібербезпека.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF CYBER RESILIENCE OF TRADITIONAL AND AUTONOMOUS VESSELS

Mikhailov S.A., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
Chuiko Y.I., Master student
https://orcid.org/0009-0004-5696-4981
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *The article examines the digital transformation process within the maritime industry and the transition to the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). A comparative analysis of cyber threats facing traditional manned vessels and fully autonomous vessels is conducted. Particular attention is focused on the shifting nature of risks resulting from the elimination of the "human factor," which transforms threats from operational to catastrophic. New attack vectors and their implications for maritime safety are described. The article also highlights the role of the new regulatory framework, specifically IACS Unified Requirements UR E26 and E27, in establishing cyber resilience standards as a mandatory condition for modern vessel operations.*

Keywords: *maritime digitalization, autonomous ships (MASS), cyber resilience, IACS UR E26 and E27, cyber attack vectors, human factor, maritime cybersecurity.*

У наш час морська галузь активно впроваджує цифрові технології, що призводить до стирання кордонів між інформаційними технологіями (IT) та операційними технологіями (OT). Системи, що раніше працювали в ізоляції, тепер підключені до Інтернету для віддаленого моніторингу, оптимізації та обслуговування. Ця зв'язаність розвіяла міф про безпеку через "повітряний зазор", піддавши судна новим і складнішим кібератакам. Збій або зловмисне захоплення комп'ютерних систем, що управляють навігацією, силовою установкою або вантажними операціями, може призвести до катастрофічних наслідків. Усвідомлюючи, що кіберінциденти можуть мати згубний вплив на життя, власність та навколишнє середовище, морське співтовариство почало переглядати підходи до безпеки.

Поява морських автономних надводних суден (MASS) закликала кардинально підвищити ефективність та усунути ризики, пов'язані з людським фактором. Однак, усуваючи один набір ризиків, автономія створює новий, потенційно небезпечніший. Якщо на традиційному судні кібератака - це серйозний інцидент, що вимагає реакції екіпажу, то на автономному судні - це фундаментальна загроза, здатна негайно призвести до втрати судна.

Рисунок 1 - Розподіл причин морських аварій та інцидентів

Сучасне судно з екіпажем являє собою кіберфізичну систему з безліччю векторів атаки. Уразливості можна умовно розділити на дві категорії. Перша - це IT-інфраструктура, що включає бізнес-мережу та мережу для екіпажу. Ці мережі часто стають точкою входу для зловмисників через фішингові листи або заражені особисті пристрої, що призводить до атак програм-вимагачів, які паралізують логістику. Друга категорія - це операційні технології (OT). До них належать критично важливі системи: навігаційні комплекси, системи автоматичної ідентифікації, системи управління силовою установкою та кермовим управлінням, а також суднові енергетичні системи. Атаки на OT, такі як GPS-спуфінг або впровадження шкідливого ПЗ через USB-накопичувачі для оновлення карт, несуть пряму фізичну загрозу, аж до посадки на мілину або зіткнення.

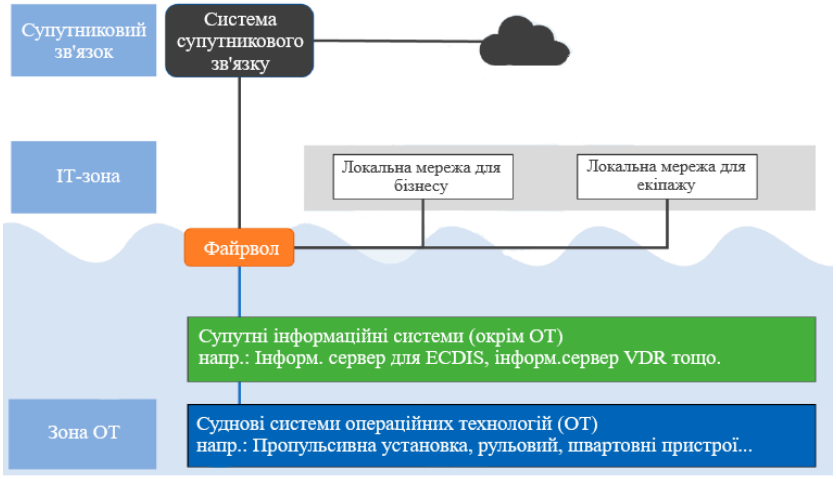


Рисунок 2 – Схема мережевої архітектури сучасного судна

Незважаючи на ці ризики, у традиційного судна є унікальний і останній рубіж оборони - людський екіпаж. Судноводій, який помітив розбіжність даних GPS з показаннями радара або візуальною обстановкою, здатний розпізнати аномалію та перейти на ручне управління. Таким чином, екіпаж виконує функцію "людського бар'єра захисту", здатного адекватно оцінити цифрові дані та запобігти катастрофі.

Зростаюча залежність від цифрових систем та усвідомлення серйозності загроз спонукали ключові галузеві організації перейти від рекомендацій до суворих вимог. Міжнародна асоціація класифікаційних товариств (IACS) визнала, що для забезпечення стійкості суден до кіберінцидентів необхідні активні дії всіх учасників галузі. Результатом цієї роботи стало прийняття двох нових Єдиних Вимог (UR) щодо кіберстійкості, які стали обов'язковими для суден, законтрактованих на будівництво після 1 січня 2024 року.

UR E27 - спрямована на забезпечення цілісності та захисту систем до їх установки на борт. Вона покладає відповідальність на сторонніх постачальників обладнання. Вимога UR E27 гарантує, що системи та обладнання проходять безпечний життєвий цикл розробки та мають вбудовані функції безпеки.

UR E26 - розглядає судно як єдиний колективний об'єкт кіберстійкості. Ця вимога націлена на забезпечення безпечного інтегрування обладнання OT та IT в єдину бортову мережу протягом усього життєвого циклу судна.

Необхідність у таких суворих, обов'язкових заходах, як UR E26 та E27, стає очевидною при аналізі ризиків автономних суден. MASS усувають людський екіпаж, а разом з ним і "людський бар'єр захисту". Судно стає абсолютно залежним від потоку даних і коректності роботи своїх систем.

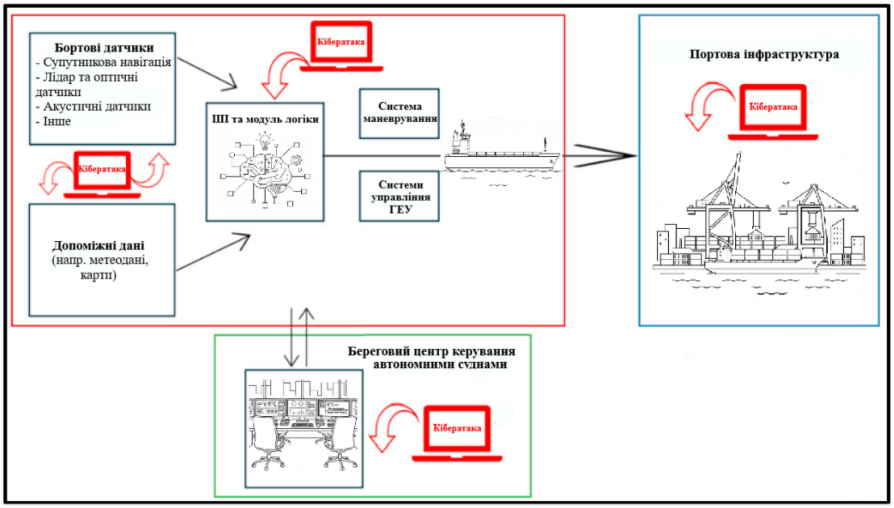


Рисунок 3 – Вектори кібератак на системи сприйняття та управління автономного судна

Така залежність породжує три принципово нові, критично небезпечні вектори атаки, відсутні на традиційних суднах. По-перше, це береговий центр управління (БЦУ). Компрометація БЦУ рівносильна захопленню не одного судна, а цілого флоту, перетворюючи зловмисника на "цифрового адмірала". По-друге, це канал зв'язку "судно-берег". MASS вимагає постійного високошвидкісного з'єднання. Атака типу "Відмова в обслуговуванні" (DoS) на цей канал не просто уповільнить роботу, а повністю "засліпить" і паралізує судно у відкритому морі. По-третє, це система сприйняття (ШІ). Автономне судно "бачить" світ через сукупність сенсорів. Зловмисник може провести скоординовану атаку, підмінивши дані з усіх цих датчиків одночасно, щоб обдурити штучний інтелект і змусити його "бачити" хибну реальність, наприклад, направити судно прямо на перешкоду.

Використовуючи класифікацію потенційних наслідків, можна побачити цей розрив:

– Відмова або виявлення: На традиційному судні це може бути відмова в доступі до вантажної системи або шпигунство за маршрутом. На автономному судні компрометація берегового центру управління або підміна навігаційних даних - це не просто відмова в доступі для власника, це перехоплення управління зловмисником. Це рівносильно цифровому викраденню вартістю в сотні мільйонів доларів.

– Руйнування: На традиційному судні GPS-спуфінг може призвести до випадкової аварії, якщо екіпаж не встигне зреагувати. На автономному судні, позбавленому людської інтуїції, скоординована атака на системи сприйняття дозволяє цілеспрямовано використовувати судно як зброю. Зловмисник, який отримав контроль, може направити газовоз або танкер на портову інфраструктуру, міст або морську платформу. Ризик перетворюється з операційного на катастрофічний.

П'ять функцій, закладених в UR E26, є планом для побудови стійкості до кібератак та уникнення катастрофічних наслідків:

– Функція "Ідентифікація" вимагає повного розуміння всіх активів (списку обладнання та його апаратного забезпечення) на борту через створення "Реєстру активів судна", щоб мати більше розуміння, яка система несе великі ризики та потребує негайного оновлення безпеки. Це перетворює захист з хаотичного на усвідомлений.

– Функція "Захист" реалізує багаторівневу оборону, необхідну для протидії загрозам. Захист реалізується через мережеву сегментацію (поділ мережі на ізольовані зони безпеки, наприклад, відділення навігації від Wi-Fi екіпажу), що запобігає поширенню атаки. Додатково застосовується "загартування" систем (відключення непотрібних функцій і портів) для мінімізації лазівок. А також, вводиться суворий контроль доступу (фізичний і логічний), щоб переконатися, що тільки авторизований персонал може взаємодіяти з критично важливими системами.

– Функція "Виявлення" наказує, що система повинна бути здатна сама діагностувати атаку в реальному часі. Це досягається через постійний моніторинг мережевої активності та періодичну верифікацію всіх функцій безпеки.

– Функція "Реагування" відповідає на питання: "Що робити, якщо атака вдалася?". Система повинна мати заздалегідь затверджений "План реагування на інциденти". Цей план повинен включати автоматичні або віддалені процедури з ізоляції мережі та переведення судна в "стан мінімального ризику" або безпечний режим.

– Функція "Відновлення" визначає, як повернути судно в стрій. Це вимагає наявності "Плану відновлення" та надійних процедур резервного копіювання та відновлення систем.

Висновки. Перехід до автономного судноводіння являє собою не просто технологічну модернізацію, а фундаментальний зсув у реалізації морської безпеки. Усуваючи з борту "людський фактор захисту" в особі екіпажу, галузь бере на себе зобов'язання замінити його цифровою системою, що володіє порівнянним або вищим рівнем надійності. Саме тому регулятори, такі як IACS, перейшли від рекомендацій до жорстких і обов'язкових вимог в особі UR E26 та UR E27. Вони створюють основу для "безпеки за замовчуванням", вимагаючи, щоб стійкість до кібератак закладалася на найбільш ранніх етапах - від проектування мікросхеми у постачальника (UR E27) до комплексної інтеграції систем на верфі (UR E26). Майбутнє судноплавства буде безсумнівно автономним, але один з головних факторів його безпечного використання це побудова стійкої системи кібербезпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Smacki A., Kaup M., Kaup M., Wiktorowska-Jasik A., Baszak M. Cybersecurity of autonomous ships in offshore wind farms // Procedia Computer Science. — 2024. — Vol. 246. — P. 5525-5534. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.703.

2. Mai V.T., Mohammadzadeh A., Alattas K.A., Taghavifard H., Ghaderpour E. Cybersecurity in maritime power systems: A comprehensive review of cyber threats and mitigation techniques // Electric Power Systems Research. — 2025. — Vol. 247. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111797

3. Mikhailov S.A., Shevtsov Y.S., Kharchenko R.Yu. American Bureau of Shipping International Rules for Marine Automated Systems // Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології» (24–26 вересня 2020 р.). — Одеса, 2020. — С. 82–84. https://icst-conf.com/2020.pdf

4. International Association of Classification Societies (IACS). Unified Requirements E26 & E27 on Cyber Resilience. — IACS Joint Working Group on Cyber Systems. https://www.classnk.or.jp/hp/en/activities/cybersecurity/ur-e26e27.html

5. Макаренко Ю.Ю. Наслідки загроз у судновому кіберпросторі. — Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології», Одеса, 2020. https://icst-conf.com/2020.pdf

6. Too D., Axon L., Agrafiotis I., Goldsmith M., Creese S. Enhancing maritime cyber situational awareness: A cybersecurity visualisation for non-experts // Computers & Security. — 2025. — Vol. 154. https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104433

МЕТОДОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КІБЕРБЕЗПЕКІ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН

Михайлов С.А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
Крицький В.І., студент
https://orcid.org/0009-0002-1578-3725
Національний Університет «Одеська Морська Академія»

Анотація: *Дана стаття розкриває ключові аспекти середовища кібербезпеки автономних суден на основі міжнародних стандартів і передових практик. Автономні судна – це технологічний прорив у морському транспорті, що передбачає масштабне використання інформаційних технологій, автоматизації та штучного інтелекту для зниження залежності від екіпажу та підвищення ефективності морських перевезень. Однак інтенсивна цифровізація супроводжується зростанням кіберзагроз, що вимагає комплексних заходів щодо забезпечення інформаційної безпеки (ІБ).*

Ключові слова: *судно, кіберфізична система, кіберзахист, морська індустрія, автоматизація, ІМО, кібератаки, сегментування, управління ризиками.*

METHODOLOGY, TECHNOLOGIES AND TRENDS IN THE CREATION OF CYBERSECURITY SYSTEMS FOR AUTONOMOUS SHIPS

Mykhailov S.A., Doctor of Technical Sciences, Professor
https://orcid.org/0000-0002-3218-2238
Krytskyi V.I., student
https://orcid.org/0009-0002-1578-3725
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *This article highlights the key aspects of the cybersecurity environment for autonomous ships based on international standards and advanced practices. Autonomous vessels represent a technological breakthrough in maritime transport, implying extensive use of information technologies, automation, and artificial intelligence to reduce crew dependence and increase the efficiency of maritime logistics. However, intensive digitalization is accompanied by a growth in cyber threats, requiring comprehensive measures to ensure information security (IS).*

Keywords: *ship, cyber-physical system, cybersecurity, maritime industry, automation, IMO, cyberattacks, segmentation, risk management.*

Автономні судна, які здатні виконувати операції без постійної присутності екіпажу, набирають популярності завдяки можливості знизити витрати, підвищити точність навігації та ефективність транспортного ланцюга. Водночас вони містять складні цифрові системи (рис.1): системи автоматичного керування, дистанційного моніторингу, навігаційні та комунікаційні технології. Ці системи формують уразливу поверхню для кібернетичних атак. Важливим завданням стає забезпечення безперервності функціонування суден і захист від несанкціонованого втручання.

Основні міжнародні документи в галузі кібербезпеки морського судноплавства.

MSC.428(98) IMO (Резолюція Міжнародної морської організації, прийнята у 2017 році): Ця резолюція інтегрує управління кіберризиками до Систем управління безпекою (SMS) суден. Вона наголошує на необхідності врахування кіберзагроз у щоденній експлуатації суден, вимагає впровадження системи управління ризиками, а також процедур для планування, моніторингу та реагування на кіберінциденти. Відсутність дотримання цих вимог може призвести до адміністративних санкцій та заборони виходу суден у рейс.

IEC 62443 та IEC 61162-460: Ці стандарти встановлюють вимоги до безпеки промислових та суднових інформаційних та операційних технологій. IEC 62443 фокусується на захисті промислових автоматизованих систем загалом, а IEC 61162-460 визначає стандарти безпеки цифрових суднових мереж, зокрема взаємозв'язок суднових навігаційних та комунікаційних систем через Ethernet з урахуванням захисту і протидії загрозам.

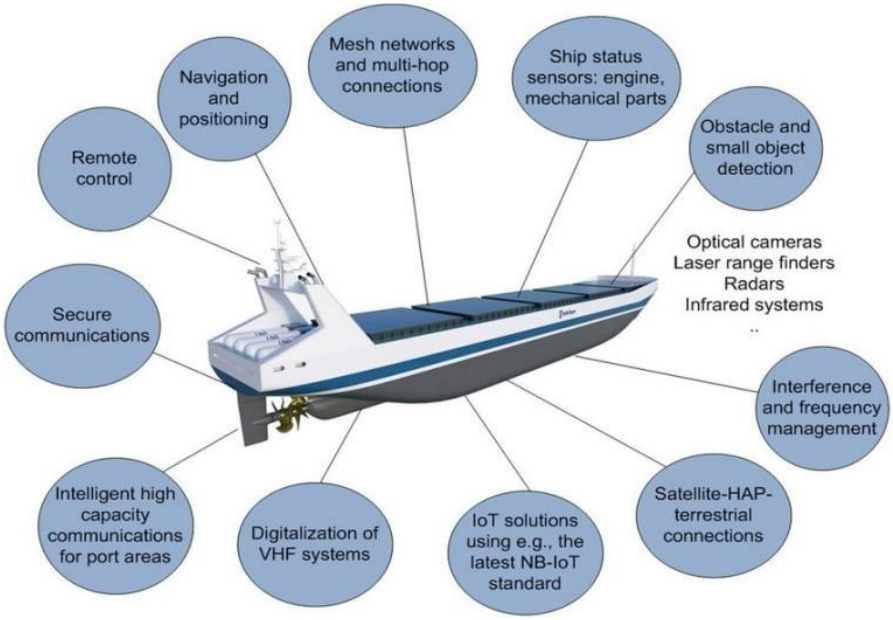


Рисунок 1 – Структура систем зв'язку та керування автономного судна

UR E26/E27 IACS (Єднані вимоги Міжнародної асоціації класифікаційних товариств): UR E26 стосується кіберрезистентності (здатності протистояти кіберзагрозам) судна в цілому, включаючи OT та IT системи, відповідає за безпеку управлінських процесів. UR E27 акцентує увагу на кібербезпеці окремих бортових систем і обладнання (CBS). Вони мають на меті забезпечити безперебійність функціонування суднових систем та відповідність вимогам міжнародних стандартів як-от ISO 27001 та IEC 62443.

Ключові вимоги та заходи:

- Впровадження системи управління ризиками кібербезпеки для всіх компонентів морської інфраструктури, що включає аналіз і оцінку загроз, розробку заходів з протидії, навчання персоналу;
- Забезпечення комплексного моніторингу кіберінцидентів та оперативного реагування на них;
- Врахування життєвого циклу судна, щоб гарантувати кібербезпеку не тільки під час експлуатації, а й у процесі проектування, будівництва, модернізації та виведення з експлуатації;
- Узгодження політик і процедур кібербезпеки на рівні суден, портів і судноплавних компаній.

Технології та системи кіберзахисту автономних суден

Сегментування мереж (IT/OT сегментація). Сучасні морські судна мають складні інформаційні системи, що включають як інформаційні технології (IT), так і операційні технології (OT), наприклад, навігаційні системи, системи управління двигунами, датчики і телеметрію. Сегментування передбачає поділ мережі на ізольовані сегменти відповідно до їх функцій і критичності. Це дозволяє:

1. Локалізувати будь-яку кіберзагрозу у межах одного сегмента, не даючи їй розповсюдитись на критично важливі компоненти.

2. Підвищити контроль над трафіком між сегментами за допомогою міжмережевих екранів (firewalls), які блокують несанкціонований доступ.

3. Використовувати системи контролю доступу NAC (Network Access Control) для автентифікації та авторизації пристроїв при підключенні до мережі судна.

4. Забезпечити детальний аудит і моніторинг активності у межах кожного сегмента для виявлення аномалій та потенційних атак.

5. Таке суворе розмежування є критичним, оскільки OT-системи зазвичай більш уразливі через свою специфіку та тривалий життєвий цикл без частих оновлень.

SIEM-платформи для централізованого моніторингу (Security Information and Event Management). Платформи збирають інформацію про події безпеки з усіх сегментів мережі й систем судна — включно з навігаційними даними, телеметрією, комунікаційними каналами. Основні переваги SIEM:

1. Автоматичний збір і кореляція подій безпеки в режимі реального часу.

2. Виявлення аномалій у поведінці систем, виявлення підозрілої активності.

3. Своєчасне оповіщення відповідальних команд для негайного реагування.

4. Можливість аналізу інцидентів та формування звітності для подальшого удосконалення кібербезпеки.

5. SIEM дозволяють суттєво підвищити рівень прозорості і оперативності у виявленні кіберзагроз.

Криптографічний захист. Для захисту каналів зв’язку між судном і береговими пунктами застосовуються сучасні криптографічні протоколи, наприклад, TLS (Transport Layer Security) та IPsec. Вони забезпечують:

1. Конфіденційність передаваних даних за допомогою шифрування.

2. Аутентифікацію пристроїв і користувачів, що з’єднуються, часто із застосуванням цифрових сертифікатів.

3. Багатофакторна ідентифікація підвищує рівень безпеки доступу.

4. Використання цифрових підписів гарантує цілісність даних і підтверджує авторство оновлень програмного забезпечення, унеможливлюючи їх підробку або несанкціоновані зміни.

Системи IDS/IPS (Intrusion Detection Systemта/Intrusion Prevention System) – це системи, які:

1. Безперервно моніторять мережевий трафік для виявлення підозрілої активності, що може свідчити про спроби вторгнення.

2. В автоматичному режимі блокують виявлені атаки чи відхиляють підозрілі пакети.

3. Унікально адаптуються до морських умов роботи, беручи до уваги обмеження пропускної здатності каналів і переривчастість зв’язку, що є характерним для морського середовища.

4. Забезпечують підтримку стійкості роботи систем навіть під час мережевих атак.

5. Взаємодія і координація. Ефективність мережевого захисту у морській індустрії базується на комбінуванні цих технологій із правильно організованими процесами. Це вимагає:

6. Наявності чітких політик безпеки і процедур реагування.

7. Навчання персоналу для підвищення обізнаності у питаннях кібербезпеки.

8. Регулярних аудитів і тестувань систем, включаючи симуляції кіберінцидентів.

9. Неперервного оновлення і вдосконалення засобів захисту відповідно до появи нових загроз.

Автоматизоване оновлення ПЗ

Захищений канал отримання оновлень та конфігурацій з берегових центрів з використанням цифрових підписів і засобів верифікації дозволяє безпечно підтримувати актуальність систем, запобігаючи атакам через зловмисне ПО.

Використання штучного інтелекту

Інтелектуальні алгоритми аналізують великі обсяги даних із датчиків, журналі подій, поведінкових моделей користувачів для своєчасної оцінки загроз та оптимізації планів дій (наприклад, зміна маршрутів або ізоляція уражених систем).

Приклади впроваджень і провідні компанії.

Sea Machines Robotics (США) одним із лідерів у розробці автономних та віддалено керованих суден із глибокою інтеграцією кібербезпеки. Їхня платформа SM300 забезпечує:

Автономне керування суднами різного розміру з можливістю дистанційного моніторингу та управління в реальному часі. Системи штучного інтелекту для розпізнавання перешкод і запобігання зіткненням, що значно підвищує безпеку і знижує залежність від людського фактора. Створення безпечного, адаптованого до складних навігаційних умов середовища, з функціями для роботи у GPS- та комунікаційно обмежених зонах. Комерційне та оборонне застосування з широким спектром автономних рішень, які інтегруються безпосередньо на робочі судна для підвищення ефективності операцій.

Kongsberg Gruppen (Норвегія) спеціалізується на комплексних рішеннях для морської автоматизації і безпеки, включаючи:

-Багаторівневу архітектуру кіберзахисту, яка ізолює ключові системи і забезпечує їх резервування для збереження безперервної роботи.х

- Використання резервних каналів зв'язку для підвищення надійності, що важливо для критичних операцій у морських умовах.

- Комплексні рішення для автоматизації, які включають кібербезпеку як фундаментальний елемент стратегії захисту суден від кіберзагроз.

- Співпрацю з провідними судноплавними компаніями для інтеграції систем, які відповідають міжнародним стандартам лицензій та безпеки.

A.P. Moller–Maersk. Великі морські перевізники, такі як A.P. Moller–Maersk, впроваджують SIEM-системи для централізованого моніторингу подій безпеки по всьому флоту, а також використовують сучасні біометричні технології і розвинуті засоби контролю доступу для посилення захищеності:

1. Впровадження багатофакторної аутентифікації та цифрових сертифікатів для забезпечення безпечного доступу до критичних систем.

2. Застосування аналітичних платформ для автоматичного виявлення та реагування на кіберінциденти.

3. Впровадження політик кібербезпеки на корпоративному та судновому рівнях, що відповідають міжнародним нормативам, наприклад MSC.428(98).

4. Постійне оновлення інфраструктури кібербезпеки у відповідь на зростаючі загрози в кіберпросторі морської індустрії.

Навчання персоналу й операційні практики

Ключовий аспект безпеки — регулярне навчання членів екіпажу суден (у випадку напівавтономних систем), а також операторів берегових центрів. Проводяться кіберучення, моделюються інциденти, відпрацьовується швидке реагування. Для підтримки комунікації і координації виділяються захищені канали зв'язку.

Тенденції розвитку

- Автоматизація і розширений моніторинг із використанням штучного інтеллекту.
- Глобальна інтеграція блокчейн-технологій для підвищення прозорості і безпеки цифрових ланцюгів постачання.
- Впровадження квантових криптографічних засобів для захисту навігаційних систем нового покоління.
- Створення єдиних міжнародних екосистем безпеки суднових і портових операцій.

Висновки. Інформаційна безпека автономних суден — це сукупність технологічних, нормативних і організаційних заходів, що разом забезпечують безперебійне,

безпечне і надійне функціонування сучасного морського транспорту. Застосування інноваційних технологій у поєднанні з дотриманням міжнародних стандартів і регулярним навчанням персоналу утворюють міцний фундамент кіберзахисту суден нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Козачок Ю. «Колективна кібербезпека автономних морських суден на основі децентралізованого інтелектуального аналізу» (2025) http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/904

2. Barbara Stępień, «Defending the fleet: Cybersecurity and autonomous ships» (2025) – https://www.researchgate.net/publication/387232454_Defending_the_Fleet_Cybersecurity_and_Autonomous_Ships

3. A Smacki, «Cybersecurity of autonomous ships in offshore wind farms» (2024) — https://www.researchgate.net/profile/Andrzej-Smacki/publication/386216586_Cybersecurity_of_autonomous_ships_in_offshore_wind_farms/links/675573e0ad10b614ef37cf23/Cybersecurity-of-autonomous-ships-in-offshore-wind-farms.pdf

4.«Cyber risk assessment of cyber-enabled autonomous cargo vessel» (2024) — https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874548224000362

5. DNV, «Maritime Cyber Security Regulations» (2024) — https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/maritime-cyber-security/regulations/

6. Marlink, «Understanding Maritime Cyber Regulations» (2025) — https:6.rlink.com/resources/knowledge-hub/understanding-maritime-cyber-regulations/

7. ArXiv, «Maritime Cybersecurity: A Comprehensive Review» (09sep2024) — https://arxiv.org/abs/2409.11417

IMPROVING NETWORK TRAFFIC IN BANDWIDTH-RESTRICTED MILITARY INFRASTRUCTURES USING PI-HOLE

[1]**Levinskyi M.V.**, Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-6544-5110
[2]**Levinskyi V.M.**, Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-3563-528X
[3]**Volovshchykov V.Yu.**, Ph.D., Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-4454-2314
[1]National University "Odesa Maritime Academy"
[2]Odessa National University of Technology
[3]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Abstract: *This paper presents a methodology for optimizing network traffic in tactical, bandwidth-constrained military environments using a DNS-based filtering solution. By deploying the open-source Pi-hole software on low-cost hardware, the study addresses the critical challenge of "parasitic" network traffic consuming scarce satellite and radio bandwidth. The research validates that this approach significantly reduces non-essential data transfer, improves page load times, and enhances the security posture of forward-deployed networks without requiring expensive proprietary hardware.*

Keywords: *tactical communications, bandwidth optimization, network security, DNS filtering, Pi-hole, C4ISR, SATCOM.*

Relevance of the Topic

Modern military operations are fundamentally data-driven, relying heavily on the dissemination of real-time intelligence and Command and Control (C2) data [1]. However, tactical units operating at the edge often rely on high-latency, low-bandwidth connections such as Satellite Communications (SATCOM) and tactical radio links. In these environments, every kilobyte of data is a finite resource. A significant issue often overlooked is the consumption of this scarce bandwidth by "parasitic" traffic—telemetry, background updates, and advertising trackers generated by Commercial Off-The-Shelf (COTS) devices [2]. Mitigating this traffic is essential to ensure mission-critical data flows are not obstructed.

Problem Statement

The scientific and practical problem addressed in this research is the inefficiency of current traffic management in tactical networks regarding content-aware filtering. While Software-Defined Networking (SDN) is increasingly used to manage routing and link resilience, it generally does not filter the content or purpose of the traffic. Consequently, an SDN controller may route an advertisement query with the same priority as a mission-critical update. There is a need for a lightweight, deployable solution that filters non-essential traffic at the source—the DNS query level—to reclaim bandwidth and harden the network against tracking domains [3].

Object of Research

The object of this research is network traffic performance within resource-constrained tactical communication environments.

Subject of Research

The subject of research is the methodology of using DNS-level filtering (Protective DNS) via single-board computers to optimize bandwidth and enhance security.

Aim of Research

The aim of this research is to design, implement, and validate a low-cost, rapidly deployable system that reduces non-essential bandwidth consumption and improves latency in tactical networks using open-source DNS filtering software.

Research Methods

The research employs a combination of experimental deployment and quantitative performance analysis. Key methods include:

System Design: integration of a Raspberry Pi 3B running Pi-hole software with a standard COTS router (ASUS RT-AX1800U) in a hub-and-spoke topology.

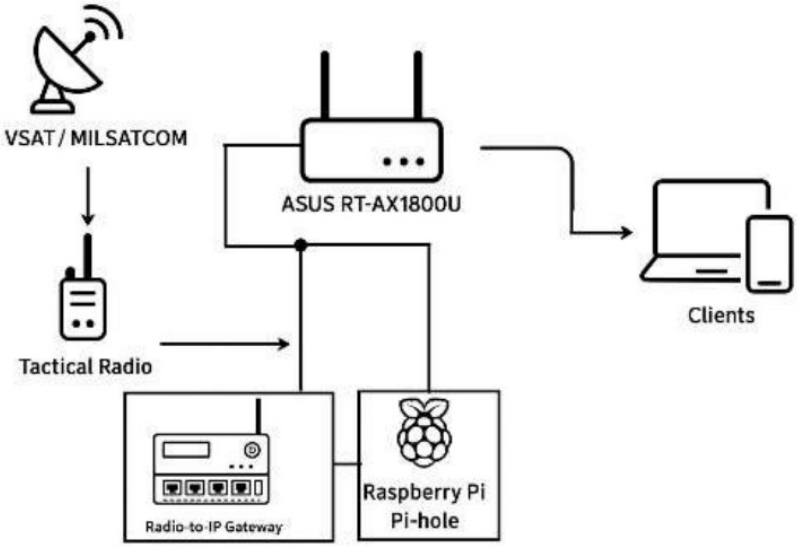


Fig. 1. Network schematic diagram

Traffic Simulation: evaluation of network performance under emulated tactical conditions (high latency).

Quantitative Analysis: measurement of key performance indicators (KPIs) including total bandwidth utilization, external DNS query volume, web page load times, and security block rates.

Main Results

System Architecture and Integration The proposed solution leverages a Raspberry Pi 3B as a dedicated DNS filtering server. The system is integrated into a tactical field network where the router's DHCP server is configured to advertise the Pi-hole's static IP as the sole DNS server for all connected clients. This ensures that all DNS requests are routed through the filter without requiring manual configuration of individual client devices (laptops, tablets, IoT sensors).

Performance Analysis Testing was conducted to compare a baseline scenario (no filter) against a filtered scenario (Pi-hole active) over 60-minute intervals. The results demonstrated significant efficiency gains:

Bandwidth Conservation: the implementation reduced total bandwidth utilization by 44% (from 270 MB to 150 MB). This reduction is attributed to the blocking of queries for ads, trackers, and telemetry, preventing the subsequent download of heavy media content associated with those domains.

Latency Reduction: local DNS caching by the Pi-hole eliminated 60% of external DNS queries. By serving repeated requests from the local cache, the system bypassed the high-latency SATCOM link (often >600ms), resulting in a 50% improvement in average web page load times (dropping from 14.2s to 7.1s).

Security Efficacy: as a "Protective DNS" solution, the system achieved a 100% block rate against a test list of malicious domains, preventing connections to known malware and Command-and-Control (C2) servers.

Operational Viability To address the physical demands of military use, the study identifies the availability of ruggedized COTS enclosures (IP67-rated, MIL-STD-810G compliant) for the Raspberry Pi, transforming it from a hobbyist device into a mission-capable appliance. Additionally, a High-Availability (HA) architecture using virtual IPs is proposed to mitigate Single Point of Failure (SPOF) risks.

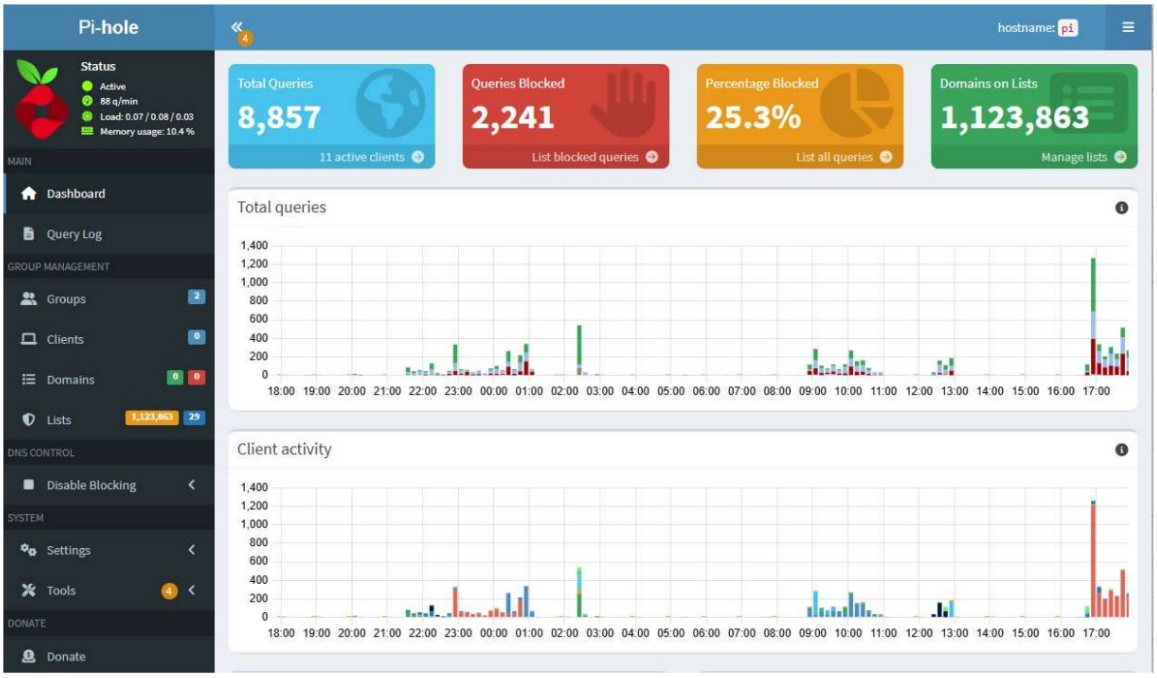


Fig. 2. Pi-hole web interface: metrics

Conclusions

The research demonstrates that a lightweight, COTS-based DNS filtering solution provides immediate and quantifiable improvements to tactical network performance. By filtering parasitic traffic at the DNS level, the proposed system effectively acts as a bandwidth multiplier, freeing up capacity for mission-critical operations. The solution is cost-effective, scalable, and complements existing SDN architectures by cleaning the traffic before it enters the routing pipe.

Perspectives for Further Research

Future work will focus on:

- Dynamic Threat Intelligence: developing modules to automatically ingest real-time threat feeds from military sources to update blocklists dynamically.

- Integration with SDN: creating interfaces where the DNS filter can signal the SDN controller to deprioritize or isolate compromised hosts.

REFERENCES

1. Shotwell, J., & Walker, A. (2019). Software-defined networking could get Army's data moving faster. U.S. Army. Retrieved from https://www.army.mil/article/230906

2. Nazari, S., Du, P., Gerla, M., Kim, J., & Capone, A. (2016). Software Defined naval network for satellite communications (SDN-SAT). In MILCOM 2016 – 2016 IEEE Military Communications Conference (pp. 360–366). IEEE.

3. Krieg, T. (2024). Defense in Depth: DNS Filtering. Mirazon. Retrieved from https://www.mirazon.com/defense-in-depth-dns-filtering

Секція 7. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Бушер В. В., професор
https://orcid.org/0000-0002-3268-7519
Захарченко В. М., професор
Кравченко В. В., магістр
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *В роботі досліджено роботу електроприводу підрулюючого пристрою з гвинтом змінного кроку, для запуску якого використовується тиристорний пристрій плавного пуску. Для зменшення впливу електропривода на розподільчу мережу використано керований компенсатор реактивної потужності з конфігурацією LLC та двома електронними ключами з ШІМ. Показано, що при повній компенсації реактивної потужності під час пуску виникає похибка, яка призводить до перекомпенсації, наслідками чого стають коливання реактивної потужності, напруги, електромагнітного моменту. Для усунення таких негативних явищ запропоновано ввести в системі керування незначне (10 %) зміщення завдання реактивної потужності замість 0. Таке рішення дозволило практично повністю видалити коливання реактивної потужності (не більше 0.5 %) в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на двигуні і в мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу. Відповідно, суттєво зменшено коливання електромагнітного моменту двигуна та його швидкості. Саме це удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності складає наукову новизну проведеного дослідження.*

Ключові слова: *пристрій плавного пуску, керований компенсатор реактивної потужності.*

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CONTROLLING THE REACTIVE POWER COMPENSATOR IN THE TRUSTER ELECTRIC DRIVE WITH A HIGH-VOLTAGE SOFT STARTER

Busher V. V., professor
https://orcid.org/0000-0002-3268-7519
Zakharchenko V.M., professor
Kravchenko V. V., magister
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000
National University “Odessa Maritime Academy”

Abstract: *The work investigates the operation of the electric drive of the thruster with a variable-pitch propeller, for which a thyristor soft starter is used. To reduce the impact of the electric drive on the distribution network, a controlled reactive power compensator with LLC configuration and two electronic keys with PWM was used. It is shown that with full compensation of reactive power during start-up, an error occurs, which leads to overcompensation, the consequences of which are fluctuations in reactive power, voltage, and electromagnetic torque. To eliminate such negative phenomena, it is proposed to introduce a small (10%) offset of the reactive power task in the control system instead of 0. This solution allowed almost completely removing the fluctuations of reactive power (no more than 0.5%) in the middle of the transient process, as well as all harmonic components of the voltage on the engine and in the SEES network during the entire transient process. Accordingly, the fluctuations of the electromagnetic torque of the engine and its speed were significantly reduced. It is this improvement in the reactive power compensator control method that constitutes the scientific novelty of the research conducted.*

Keywords: *soft starter, controlled reactive power compensator.*

Електропривод підрулюючого пристрою є одним з найпотужніших споживачів енергії в судновій електроенергетичній системі. Під час пуску і роботи пристрою не тільки споживається значна активна потужність, а й створюються значні потоки реактивної потужності, вносяться гармонійні спотворення в напругу і струми внаслідок роботи тиристорного пристрою плавного пуску. Для розв'язання цих проблем використовується керований компенсатор реактивної потужності з конфігурацією LLC та двома електронними ключами в кожній фазі компенсатора (рис. 1).

Мета роботи – удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності в підрулюючому пристрої з урахуванням особливостей механізму.

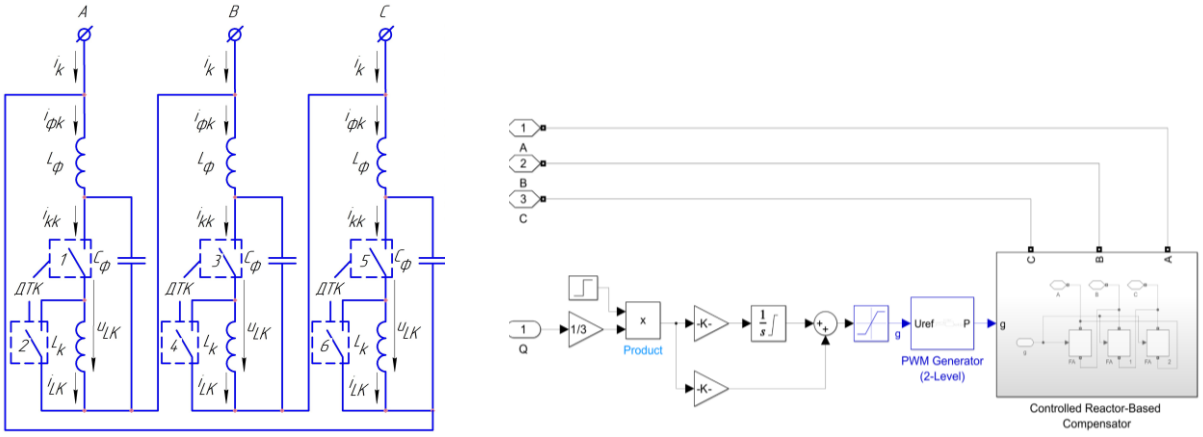


Рисунок 1 – Принципова схема трифазного керованого компенсатора реактивної потужності і система керування

В такій системі отримано перехідні процеси, графіки яких зображено на рис. 2.

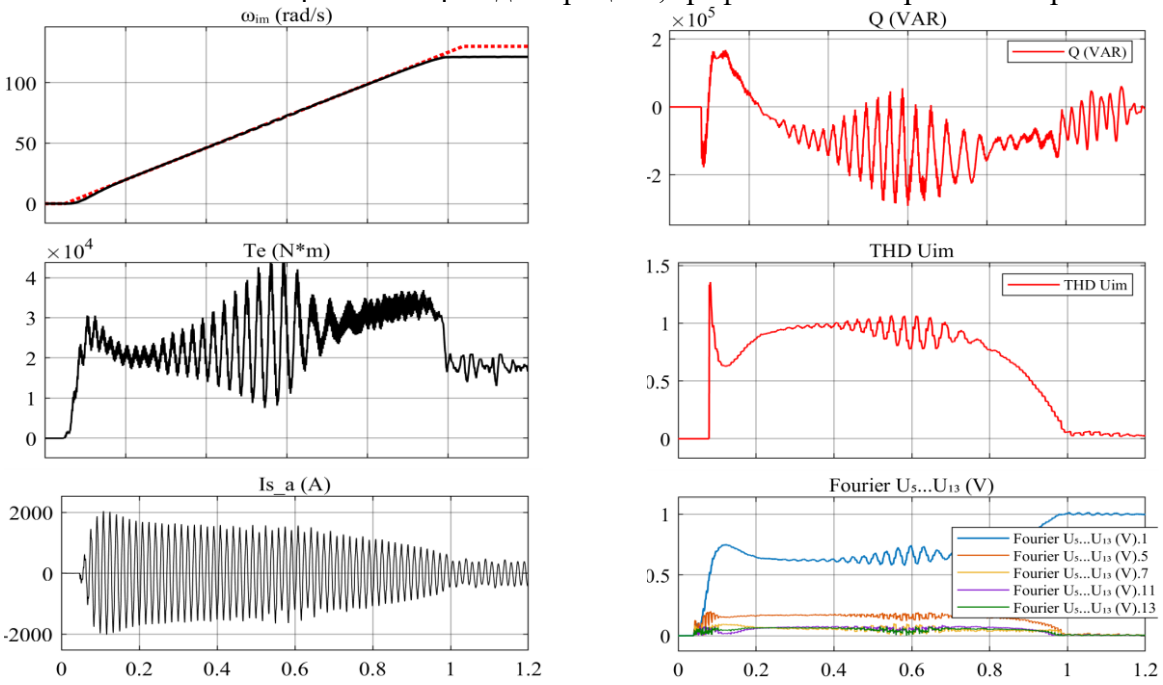


Рисунок 2 – Графіки перехідних процесів в електроприводі підрулюючого пристрою з керованим компенсатором реактивної потужності

Під час пуску асинхронного двигуна реактивна потужність поступово зменшується. Тому керуючий сигнал компенсатора повинен поступово збільшуватись. При наявності інтегральної складової в регуляторі для збільшення вихідного сигналу на його вході необхідно існування деякої позитивної швидкісної похибки, що в досліджуваній системі відповідає незначній реактивній потужності ємнісного характеру. Тобто необхідною умовою роботи є деяка перекомпенсація реактивної потужності двигуна індуктивного харак-

теру. Видно, що це призводить до виникнення коливань як реактивної потужності, так і всіх гармонійних складових напруги на двигуні, електромагнітного моменту двигуна не тільки під час перехідного процесу, а й при виході на номінальну швидкість, навіть при спрацюванні байпасного перемикача в пристрої плавного пуску. Швидкісна похибка під час пуску приблизно складає 1e5 VAR, а амплітуда коливань реактивної потужності 1.5e5 VAR, що складає відносно незначну величину – 3 і 5 % відповідно – від максимальної реактивної потужності на початку пуска.

Для усунення таких негативних явищ запропоновано ввести в системі керування незначне зміщення завдання реактивної потужності замість 0 – 3.5e5 VAR індуктивного характеру. На рис. 3 відображено перехідні процеси в електромеханічній системі підрулюючого пристрою зі зміщенням завдання на вході ПІ-регулятора компенсатора реактивної потужності.

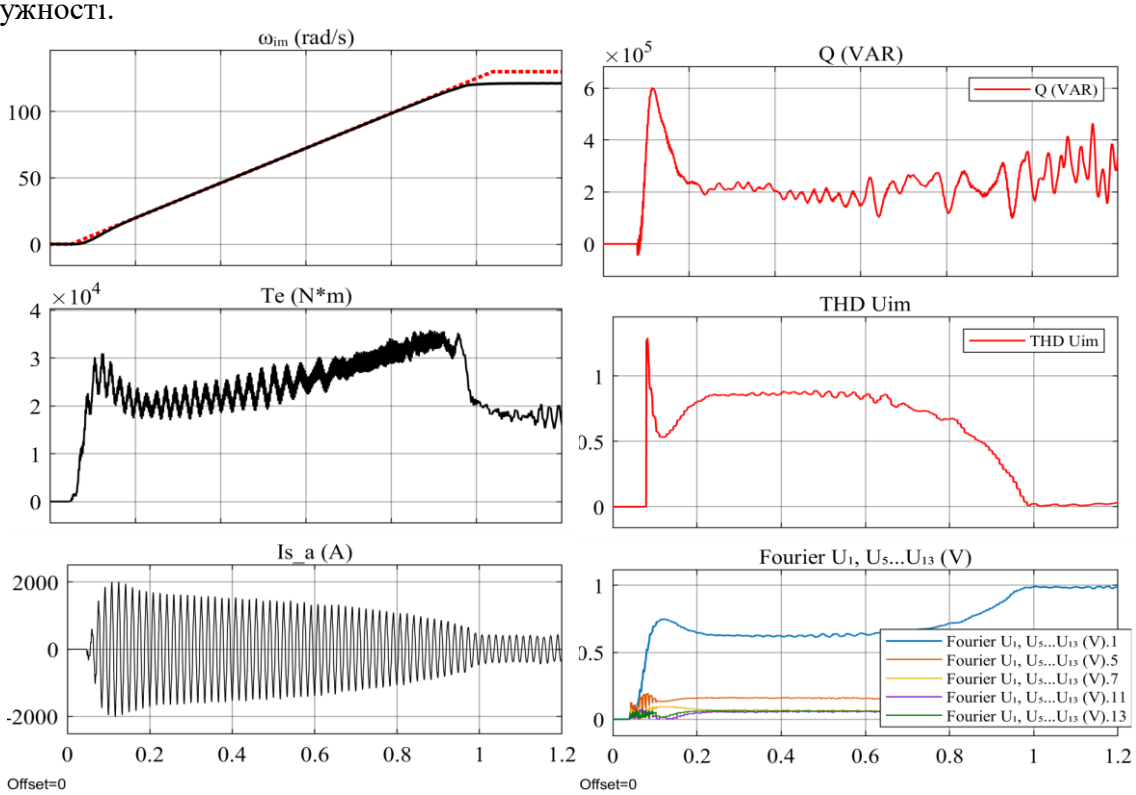


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів зі зміщенням 3e5 VAR
у керованому компенсаторі реактивної потужності

Очевидно, що запропоноване рішення дозволило практично повністю видалити коливання реактивної потужності (не більше 0.2e5 VAR) в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу. Відповідно, суттєво зменшено коливання електромагнітного моменту двигуна та його швидкості. Саме це удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності складає наукову новизну проведеного дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Захарченко В. М. Аналіз електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судновою мережею в динамічних режимах [Текст] / В. М. Захарченко, В. В. Бушер, О. В. Глазєва, К. Хандакжи // Електротехнічні та комп'ютерні системи – Київ, Техніка – Вип. 21(97). – С. 17–23. http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.21.97.2016.02

2. Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ ЕЛЕКТРОХОДІВ ПРИ МАНЕВРУВАННІ

Яровенко В.О., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-3183-6583
Шумило О.М., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-0574-1951
Одеський національний морський університет

Анотація: *Запропоновано метод моделювання перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів у ході виконання маневрених операцій. При маневруванні всі складові пропульсивних комплексів працюють на перехідних режимах. Аналіз маневрених характеристик та оцінка навантажень на гребну електроенергетичну установку проведено з урахуванням сумісної роботи всіх складових частин комплексу. Побудовано аналітичний метод розрахунку упору та моменту опору гребних гвинтів рушійно-кермових комплексів Azipod, з урахуванням їх взаємодії з корпусом судна. Розроблено аналітичний метод розрахунку тяги та моменту опору гвинтів підрулюючих пристроїв з урахуванням гідродинамічних процесів їх взаємодії з каналом підрулюючого пристрою. Розроблено метод оцінки маневрених характеристик електроходів та навантажень на їх електроенергетичні установки при маневруванні. Виявлено ступінь впливу частки потужності гребних гвинтів підрулюючих пристроїв у сумарної потужності електроенергетичної системи, та ступінь впливу швидкості руху судна на показники маневреності, та на показники функціональності електроенергетичної установки.*

Ключові слова*: електрохід, пропульсивний комплекс, підрулюючи пристрої, Azipod, аналітичний метод розрахунку тяги та моменту опору гвинтів, показники перехідних процесів.*

MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC SHIPS' PROPULSION COMPLEXES DURING MANEUVERING

Yarovenko V.O., Doctor of Technical Sciences, Professor
https://orcid.org/0000-0003-3183-6583
Schumylo O.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-0574-1951
Odessa National Maritime University

Abstract: *A method for modeling transient modes of electric ships' propulsion complexes during maneuvering operations has been proposed. When maneuvering, all propulsion complexes' components operate in transient modes. An analysis of the maneuvering characteristics and assessment of the loads on the propelling electrical power plant was conducted taking into account joint operation of all the complex's constituents. An analytical method for calculating the thrust and moment of resistance of the propellers of the Azipod propulsion and steering complexes has been developed considering their interaction with the ships' hull. An analytical method for calculation of the thrust and the moment of resistance of the thrusters' propellers has been worked out taking into account hydrodynamic processes of their interaction with the thrusters' channel. A method for assessing the electric vessels' maneuvering characteristics and the loads on their electrical power plants during maneuvering has been developed. The degree of influence of the part of the power of the thrusters' propellers in the total power of the electric power plant and the degree of influence of the vessel speed on the electrical power plant maneuverability and functionality indicators have been revealed.*

Key words*: electric ship, propulsion complex, thrusters, Azipod, analytical method for calculation of the propellers' thrust and moment of resistance, indicators of transient processes.*

Необхідність в оцінці маневрених характеристик суден виникає вже на початкових стадіях їх проектування. Маневреність судна залежить від можливостей його гребної установки. При маневруванні гребна установка сприймає додаткові навантаження, тому стає питання щодо оцінки величин цих навантажень та визначення можливостей гребної установки забезпечити судну необхідні маневрені властивості.

Сучасні електроходи обладнанні гребними електроенергетичними установками (ГЕЕУ). Вони можуть бути побудовані за класичним варіантом, за варіантом рушійно-кермового комплексу Azipod, з використанням підрулюючих пристроїв (ПП). Основна проблема в процедурі оцінки маневрених характеристик – у невизначеності сил та моментів в електроприводах рушійно-кермового комплексу Azipod та в електроприводах підрулюючих пристроїв.

Тяга гвинтів гребних електродвигунів Azipod залежить від частоти обертання гвинта та від швидкості руху судна. При маневруванні і частота обертання, і швидкість руху змінюються, що вносить суттєві проблеми в математичний опис процесів в РКК Azipod. Невизначеність сил та моментів, що виникають на елементах РКК, неоднозначність кінематики потоку води та траєкторії обтікання ним елементів РКК, невизначеність процесів взаємодії РКК з корпусом судна ускладнює аналіз поведінки електроходів з РКК Azipod на маневрах. При роботі в косому потоці змінюється осьова складова швидкості натікання води на гвинт, що впливає на коефіцієнт навантаження гвинта.

В основу розрахунку коефіцієнтів упору та моменту опору гребних гвинтів, які працюють у косому потоці води, покладено методику А.Д. Гофмана. Ці коефіцієнти можуть бути представлені у виді функціональних залежностей від крокового відношення P/D, коефіцієнта навантаження гвинта σ_{T0} при осьовому натіканні води, та місцевого кута дрейфу. При маневруванні всі ці параметри змінюються, змінюються також і частота обертання гвинта (частота обертання гребного електродвигуна), швидкість натікання води на гребний гвинт та кут ψ_{Az} повороту РКК Azipod.

Алгоритм розрахунку q_R й q_Q надано на рис. 1. Для його реалізації розроблено відповідні аналітичні залежності.

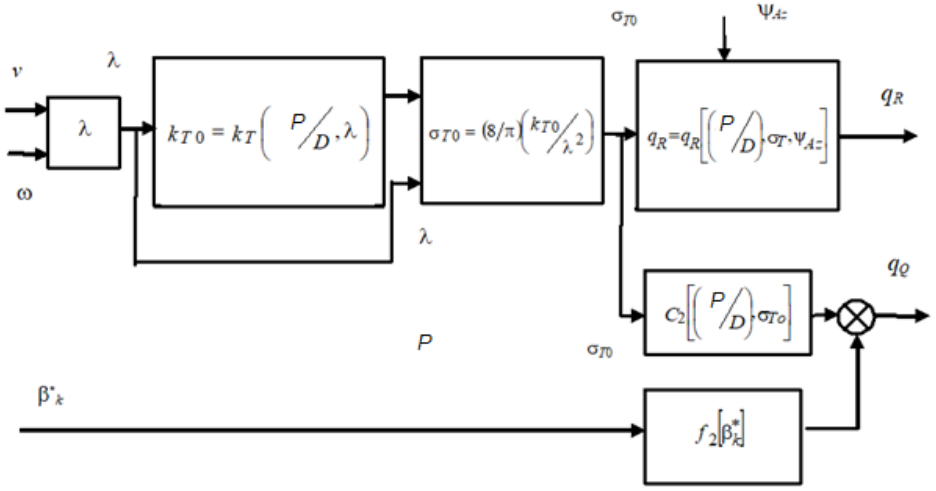


Рисунок 1 – Структурна схема алгоритму розрахунку q_R й q_Q

Подібна ситуація з'являється і при розробці математичного опису перехідних процесів в електроприводах підрулюючих пристроїв. При аналізі маневрених режимів електроходів з ПП дослідники частіше за все намагаються уникнути розгляду гідродинамічних процесів взаємодії гвинтів підрулюючих пристроїв з корпусом судна, та використовують спрощений підхід в оцінці сил та моментів, які діють на корпус судна та на гвинти ПП. Але гребний гвинт ПП працює у взаємодії з навколишнім середовищем та зі стінками каналу. На його роботу впливають в'язкісні втрати, конфігурація каналу та інші фактори. Тому, урахування гідродинамічних процесів взаємодії гвинтів ПП з корпусом судна є обов'язковим.

В основу розрахунку тяги та моменту опору гребних гвинтів підрулюючих пристроїв покладено методику А.Д. Гофмана. Вона базується на основі діаграм серійних випробувань гребних гвинтів у тонкій циліндричній трубі. Діаграми екстрапольовані в область малих значень негативного поступу гвинта, та представлені графічними залежностями коефіцієнта упору k_P та коефіцієнта моменту опору k_Q гвинта у функції відносного посту-

пу λ гвинта та крокового відношення P/D. Але, діаграми можуть бути використані для розрахунку цих параметрів на лише усталених режимах роботи. При маневруванні і крокове відношення, і поступ гвинтів безперервно змінюються. Для розрахунку k_P й k_Q від поступу та крокового відношення на неусталених режимах роботи розроблено [1] відповідні аналітичні залежності. Вони дозволяють розраховувати упор й момент опору гвинтів ПП при маневрування судна.

Запропоновано [1] аналітичний спосіб врахування взаємодії струменю води, що витікає з каналу ПП зі швидкістю v_s, з потоком води, якій натікає на цій струмінь зі швидкістю руху судна v під кутом 90°. Це явище призводить до утворення зони розрядження між корпусом судна й струменем. При цьому, зменшується сумарна сила, яка діє на судно від ПП, та її момент щодо центру тяжіння.

В процесі маневрування судна всі складові його пропульсивного комплексу безперервно працюють у перехідних режимах, надаючи при цьому суттєвий вплив один на одного. Оцінка маневрених характеристик електрохода і навантажень на електроенергетичну установку може бути проведена лише за результатами математичного моделювання перехідних режимів роботи суднового пропульсивного комплексу, якій включає в себе гребну установку, гребні гвинти і корпус судна. В основу аналізу перехідних режимів покладено математичну модель, яка надана в роботі [2]. Модель включає в себе опис перехідних процесів в: генераторних агрегатах (теплових двигунах та синхронних генераторах); перетворювачах частоти та частотно-керованих гребних електродвигунах; гребних гвинтах; перетворювачах напруги та електродвигунах підрулюючих пристроїв; гребних гвинтах ПП. В математичну модель входять рівняння руху судна у зв'язаної та у незв'язаної з корпусам системах координат, с урахуванням роботи стерна (при класичному варіанті побудови пропульсивної установки).

У якості прикладу, на рис. 2 представлені результати моделювання перехідних режимів в гребній електроенергетичній установці у складі суднового пропульсивного комплексу при виході електрохода на циркуляцію. До складу гребної установки включені носові підрулюючи пристрої. Як показали дослідження [3], вони сприяють поліпшенню поворотності судна не тільки на малих, а й при середніх швидкостях руху. На рис. 2 представлено результати моделювання виходу на циркуляцію при одночасному повороті стерна та підключенням носових підрулюючих пристроїв. Умови моделювання: частка (коефіцієнт k_{TR}) потужності ПП у потужності ГЕЕУ – k_{TR} = 0,17; відносна швидкість руху судна при виході на циркуляцію – v_X = 0,5.

У момент відносного часу T = 19 починається вихід судна на циркуляцію за рахунок перекладання стерна на кут 30⁰ з одночасним включенням підрулюючих пристроїв.

На рис. 2 наведено поточні значення основних режимних показників комплексу при виконанні цього маневру. Це відносні:

потужність P_D та кутова швидкість обертання ω_D теплових двигунів;

напруга U_G та струм I_G генераторів;

напруга U_M, обертовий момент M_M і кутова швидкість обертання ω_M гребних електродвигунів;

тяга гвинтів T_{Th} підрулюючих пристроїв та струм I_{Th} їх електродвигунів;

момент M_{Th} та кутова швидкість обертання електродвигунів ПП ω_{Th};

складові швидкості руху судна v_X, v_Y та кутова швидкість його обертання Ω_Z;

кут перекладки керма β_R та кут дрейфу судна β_{dr};

складова сили опору R_X води уздовж осі X.

Відносний час – $T = v_0 t/L$ (v_0 – швидкість судна, t – поточний час, L – довжина судна).

Результати моделювання показали, що на основні параметри пропульсивного комплексу, найбільшою мірою впливають частка потужності k_{TR} електродвигунів ПП в сумарній потужності ГЕЕУ, швидкість руху v_{str} судна при виході на циркуляцію та конструктивні параметри комплексу. Зі зростанням k_{TR}, усі показники циркуляційного руху плавно знижуються, що свідчить про покращення маневрених характеристик судна.

У той же час, ступінь впливу k_{TR} залежить від швидкості виходу судна на циркуляцію. Наприклад, у суден із «середніми» маневреними властивостями ($k_{TR} < 0{,}17$) вплив роботи ПП на показники маневреності починає позначатися при швидкостях менше $v_{str} < 0{,}4$. Підключення підрулюючих пристроїв призводить до багаторазового зниження основних показників траєкторії руху судна, що свідчить про покращення маневреності електроходів. При швидкостях більше $v = 0{,}5$ вплив потужності ПП на маневрені характеристики невеликий. Це підтверджує, що при таких швидкостях руху підрулюючи пристрої неефективні. На швидкостях руху, при яких доцільно використовувати ПП, пропульсивні гребні електродвигуни працюють з малою потужністю, навантаження на суднову електростанцію невелике тому режимні показники електроенергетичної системи, як показали результати моделювання, не виходять за допустимі межі.

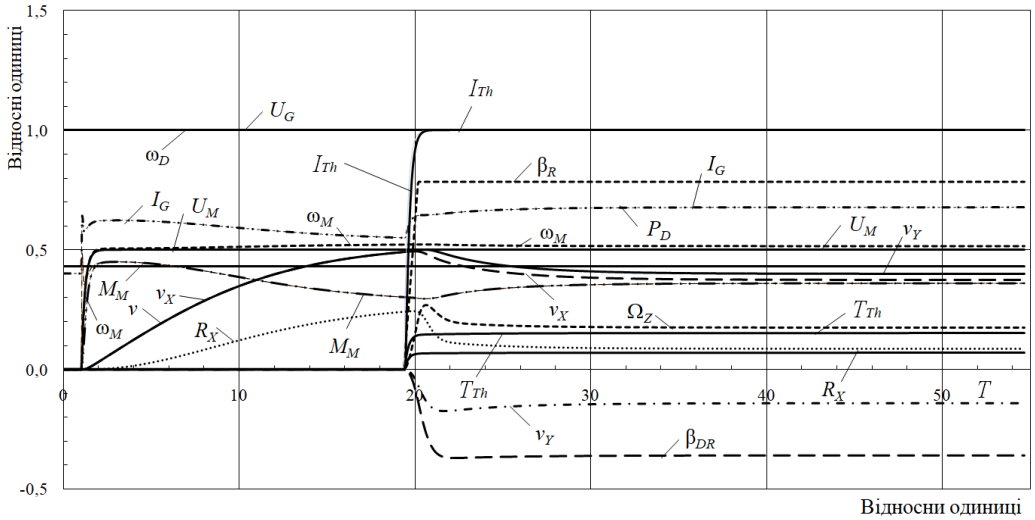


Рисунок 2 – Поточні значення режимних показників пропульсивного комплексу при сумісному маневрування кермом та підрулюючими пристроями

Висновки

1. Запропоновано метод моделювання перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів. Метод дозволяє розраховувати режимні показники всіх складових частин комплексу при маневруванні судна.

2. Розроблено аналітичні методи розрахунку упору та моменту опору гвинтів підрулюючих пристроїв та рушійно-кермових комплексів **Azipod** на неусталених режимах при зміні частоти обертання гвинтів та зміні швидкості руху судна, з урахуванням взаємодії гвинтів з корпусом електроходу.

3. Проілюстровано, у якості прикладу, вплив частки потужності електродвигунів ПП у потужності гребної електроенергетичної установки та вплив швидкості руху судна при виході на циркуляцію на показники траєкторії руху судна та на показники якості роботи електроенергетичної установки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zaritska O.I. Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. //Transport Development. – 2022. – №3(14). - Odesa: ONMU. - P. 110 - 129.

2. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S., Zaritskaya, E. I., Schumylo, A. N. (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. //Electrical Engineering & Electromechanics. – 2020. – № 5. – P. 58 – 65.

3. Oleksandr Shumylo, Volodymyr Yarovenko, Mykola Malaksianj, Oleksiy Melnyk (2023). Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters. //Scientific Journal of Maritime Research (Pomorstvo). - 2023. – Vol. 37. – P. 314 - 325.

СИНТЕЗ НЕЙРО-ПІД РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ПОТУЖНОГО ДВИГУНА В МЕХАНІЗМІ З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Ткаленко О. С., аспірант
https://orcid.org/0009-0005-7257-7671
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Анотація: *В електроприводі барабанних ножиць, робота яких супроводжується миттєвим ударом навантаження, для отримання високоякісного зрізу запропоновано рішення, за рахунок яких коливання швидкості зменшуються до мінімально можливих. Сформовано S-подібну тахограму і визначено оптимальні тривалості інтервалів зростання і зменшення прискорення та руху з постійним прискоренням. В регулятор швидкості додано повнозв'язні тришарові нейронні мережі прямого розповсюдження сигналу, що забезпечує точність регулювання швидкості в 35…45 разів вище, ніж в класичній системі управління, а точність відпрацювання заданої траєкторії – в 20…30 разів, що зменшує похибку позиціювання з 20…50 мм до 1…2 мм.*

Ключові слова: *електропривод барабанних ножиці, S-подібна тахограма, нейронна мережа прямого розповсюдження сигналу, нейро-ПІД-регулятор.*

SYNTHESIS OF A NEURO-PID SPEED REGULATOR FOR A POWERFUL ENGINE OF A MECHANISM WITH IMPACT LOAD

Tkalenko O., postgraduate student
https://orcid.org/0009-0005-7257-7671
Dnipro University of Technology

Abstract: *In the electric drive of drum shears, the operation of which is accompanied by an instantaneous impact of the load, to obtain a high-quality cut, a solution has been proposed, due to which speed fluctuations are reduced to the minimum possible. An S-shaped tachogram has been formed and the optimal durations of the intervals of increase and decrease in acceleration and movement with constant acceleration have been determined. Fully connected three-layer neural networks of direct signal propagation have been added to the speed regulator, which provides speed regulation accuracy 35...45 times higher than in the classical control system, and the accuracy of working out the given trajectory – 20...30 times, which reduces the positioning error from 20...50 mm to 1...2 mm.*

Keywords: *electric drive of drum shears, S-shaped tachogram, neural network of direct signal propagation, neuro-PID controller.*

В прокатному стані між клітями чорнової та чистової прокатки встановлюються так звані барабанні ножиці, які відрізають передні і задні кінці подкату. Цей процес супроводжується миттєвим, тривалістю до 0.2 с, ударом навантаження, яке за амплітудою співставно з номінальним моментом двигуна потужністю 3.5 МВт. Для отримання високоякісного зрізу в момент удару електропривод повинен відпрацювати так, щоб коливання швидкості були мінімально можливими.

Мета роботи – синтез регуляторів електроприводу з максимальною швидкодією та мінімальними статичними і динамічними відхиленнями швидкості від заданої величини.

Електромеханічна система барабанних ножиць з урахуванням пружних зв'язків між кінематичними елементами описується наступною системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} J_{1\,1,2}\dfrac{d\omega_{1\,1,2}}{dt} = T_{m1,2} - T_{NLm1,2} - T_{E1,2} \\ \dfrac{J_2}{i}\dfrac{d\omega_2}{dt} = (T_{E1} + T_{E2})\cdot\ i - T_{NL2} - T_{E3} \\ J_3\dfrac{d\omega_3}{dt} = T_{E3} - T_{NL3} - T_{E4} - T_{E5} \\ J_{4,5}\dfrac{d\omega_4}{dt} = T_{E4,5} - T_{NL4,5} - T_{L4,5} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{E1} = b_{s1}(\omega_{11} - \omega_2) + c_{s1}(\varphi_{11} - \varphi_2) \\ T_{E2} = b_{s2}(\omega_{12} - \omega_2) + c_{s2}(\varphi_{12} - \varphi_2) \\ T_{E3} = b_{s3}(\omega_2 - \omega_3) + c_{s3}(\varphi_2 - \varphi_3) \\ T_{E4} = b_{s4}(\omega_3 - \omega_4) + c_{s4}(\varphi_3 - \varphi_4) \\ T_{E5} = b_{s5}(\omega_3 - \omega_5) + c_{s5}(\varphi_3 - \varphi_5) \end{cases} \quad (2)$$

де моменти інерції, коефіцієнти пружних зв'язків та в'язкого тертя розраховано відповідно до технічної документації барабанних ножиць.

На підставі (1), (2) створено модель електромеханічної системи барабанних ножиць (рис. 1), до якої, крім механічної частини, входить два комплектних 4-квадрантних електропривода постійного струму.

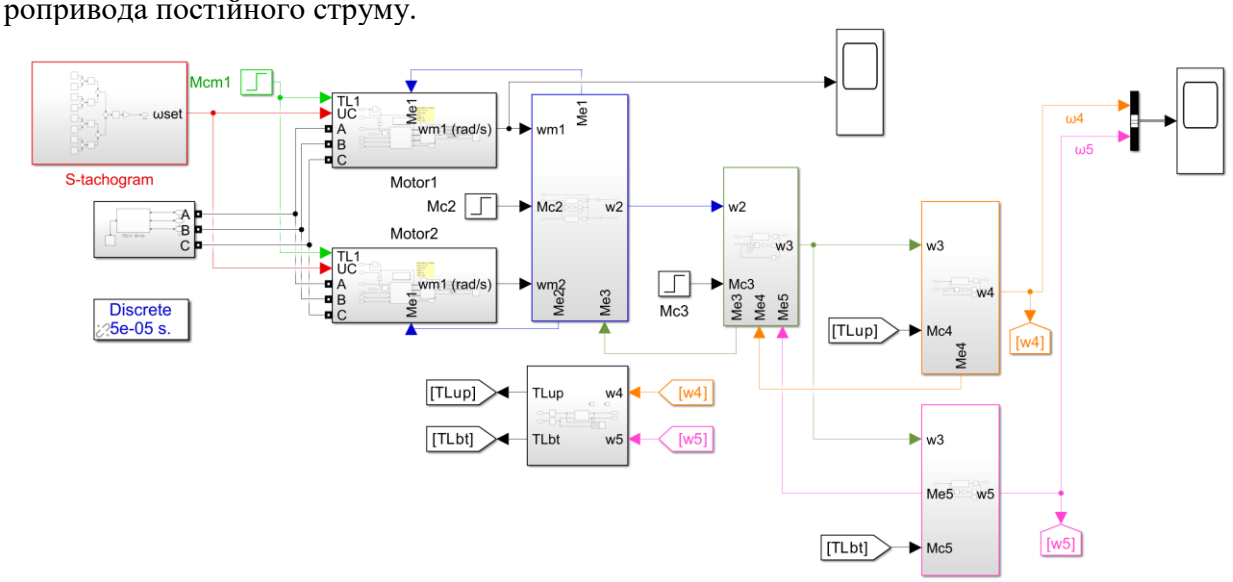


Рисунок 1 – Модель електромеханічної системи барабанних ножиць

Розрахунки перехідних процесів при стандартному налаштуванні електроприводів дозволили отримати графіки, які за абсолютними величинами і характером протікання процесів є доволі близькими до експериментальних, що отримано з диспетчерської системи прокатного стану (рис. 2). Коливання швидкості двигуна в процесі різа – від 19.3 до 20.7 рад/с складають 7% від номінальної величини.

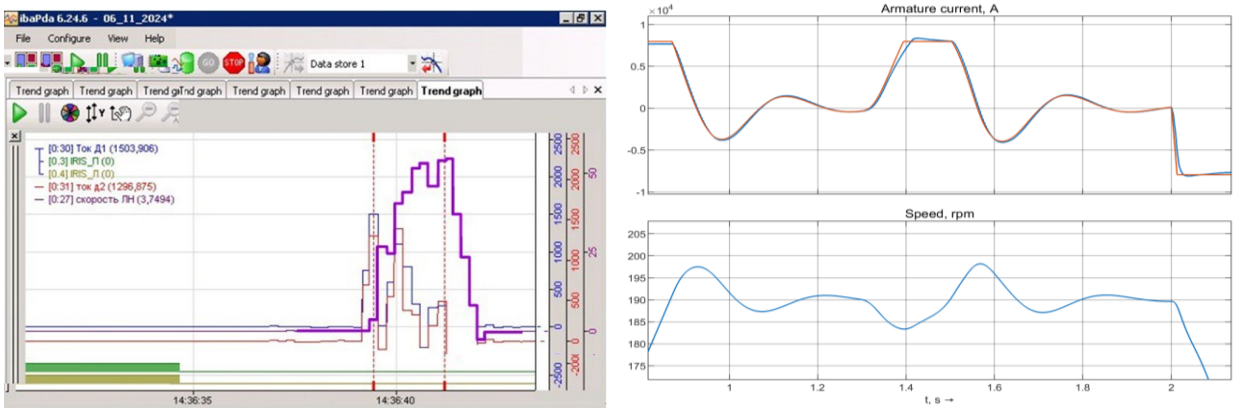


Рисунок 2 – Експериментальні графіки швидкості (зліва) та розрахункові графіки струму і швидкості (справа) в електроприводі барабанних ножиць

Для підвищення статичної і динамічної точності механізму запропоновано низку рішень.

1. Для точного визначення моменту запуску електроприводу від датчика визначення переднього і заднього кінців подкату сформовано S-подібну тахограму с заданими інтервалами зростання та зменшення прискорення dTs і руху з постійним прискоренням Ts.

2. В електроприводі створено додатковий внутрішній контур напруги тиристорного перетворювача, який забезпечує стабілізацію коефіцієнта підсилення і швидкодію перетворювача в зонах знакозмінних струмів.

3. В регулятор швидкості додано повнозв'язні тришарові нейронні мережі прямого розповсюдження сигналу з невеликою кількістю нейронів (3…5) (рис. 3).

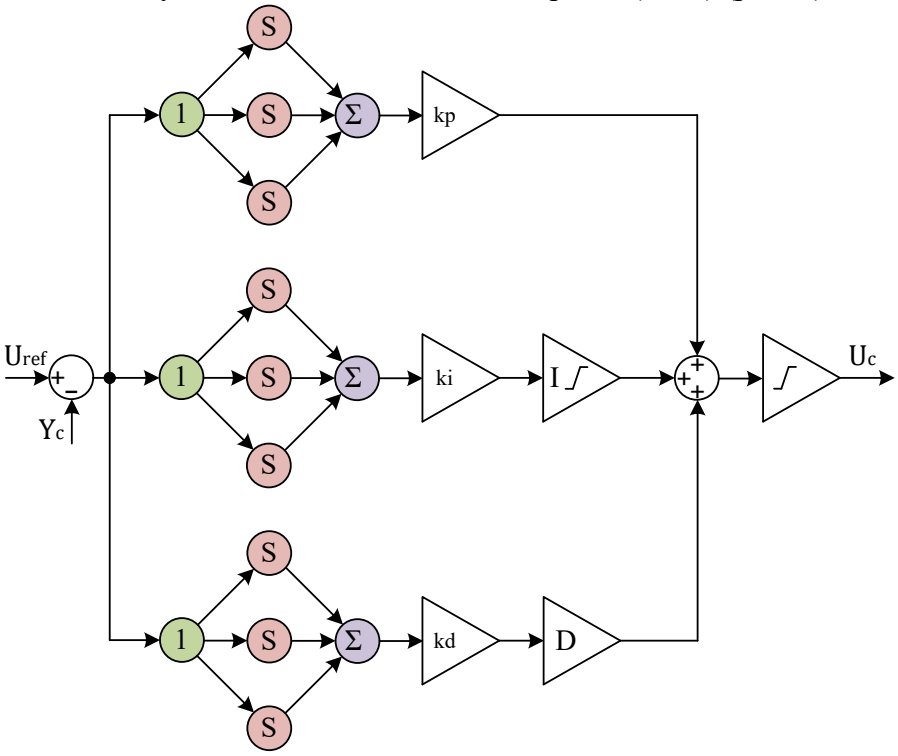


Рисунок 3 – Структурна схема нейро-ПІД регулятора

При використанні гіперболічного тангенсу як функцій активації прихованих і вихідних нейронів процедура навчання за критерієм мінімальної миттєвої помилки в кожному циклі роботи дискретного регулятора дозволила суттєво покращити показники якості електропривода і механізму. На рис. 4 співставлено перехідні процеси в електроприводах з лінійними і нейро-регуляторами і помилка відпрацювання шляху при формуванні S-подібної траєкторії.

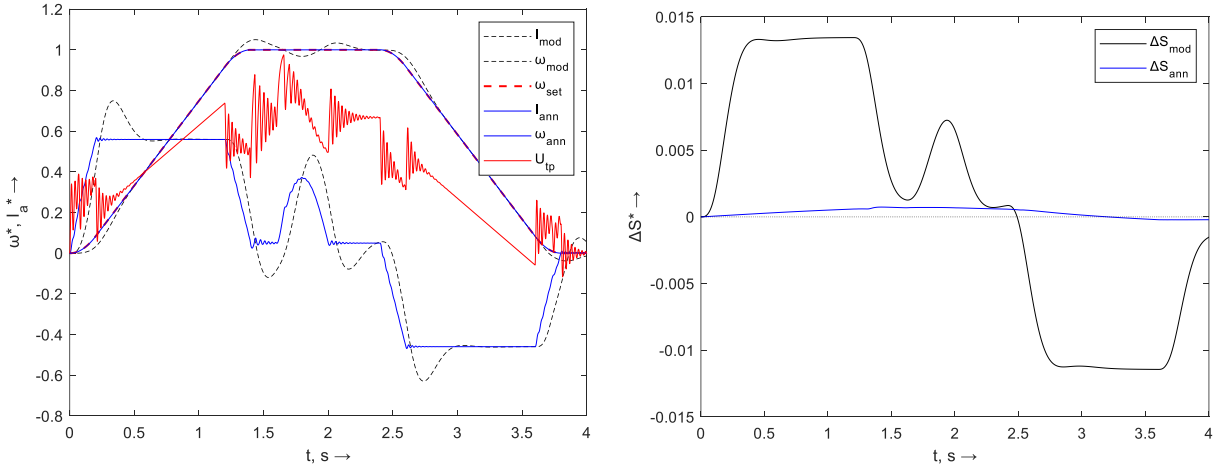


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів в електроприводах з лінійними (mod) і нейро-ПІД (ann) регуляторами (зліва) та помилка відпрацювання траєкторії переміщення (справа)

Вочевидь, що підвищення плавності розгону покращує прогноз точності позиціонування ножа, система з нейро-регуляторами забезпечує точність регулювання швидкості в 35…45 разів вище проти класичної системи управління, а точність відпрацювання заданої траєкторії – в 20…30 разів. В абсолютних одиницях це виявляється у похибці 20…50 мм у базової системи і 1…2 мм у системі з нейрорегуляторами.

Таблиця 1 – Залежності шляху до моменту врізання і помилки позиціювання від параметрів S-подібної тахограми

Ts/Tu	dTs/Tu	RMSEs_mod	RMSEs_ann	S*різу	ΔS*mod	ΔS*ann
40	5	0.0172	0.00091	1.150	0.0347	0.00140
40	10	0.0137	0.00052	1.100	0.0291	0.00079
40	20	0.0108	0.00047	1.000	0.0205	0.00069
50	5	0.0102	0.00050	1.050	0.0159	0.00081
50	10	0.0101	0.00043	1.000	0.0159	0.00066
50	**20**	**0.0098**	**0.00041**	**0.900**	**0.0159**	**0.00061**
60	5	0.0094	0.00045	0.950	0.0134	0.00074
60	**10**	**0.0094**	**0.00040**	**0.900**	**0.0134**	**0.00063**
60	20	0.0092	0.00044	0.800	0.0134	0.00076

Висновки. В електроприводі барабанних ножиць, робота яких супроводжується миттєвим ударом навантаження, для отримання високоякісного зрізу запропоновано низку рішень, за рахунок яких коливання швидкості зменшуються до мінімально можливих.

1. Сформовано S-подібну тахограму і визначено оптимальні тривалості інтервалів зростання і зменшення прискорення та руху з постійним прискоренням.
2. В регулятор швидкості додано повнозв'язні тришарові нейронні мережі прямого розповсюдження сигналу, що забезпечує точність регулювання швидкості в 35…45 разів вище, ніж в класичній системі управління, а точність відпрацювання заданої траєкторії – в 20…30 разів, що зменшує похибку позиціювання з 20…50 мм до 1…2 мм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ng, G.; Deleanu, S.; Prévost, J.-P.; Carpenter, D. Improving the operation of a flying dividing shear by using Direct Torque Control. 2017 International Conference on Modern Power Systems
2. Kaminski, M.; Tarczewski, T. Neural Network Applications in Electrical Drives – Trends in Control, Estimation, Diagnostics, and Construction. Energies 2023, 16, 4441. https://doi.org/10.3390/en16114441
3. Cheng, M.; Zhai, P.; Zhang, Y.; Li, J.; Feng, K. A Voice Coil Motor-Driven Precision Positioning System Based on Self-Learning Nonlinear PID. Transactions of China Electrotechnical Society. 2023, 38, 1519-1530. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221383
4. Hamad A. Estimating Single Layer Bi-Channel Neural Networks Architecture for Speed Control of Variable Reluctance Motors. Energies 2025, 18(5), 1066; https://doi.org/10.3390/en18051066
5. Rubaai, A.; Young, P. Hardware/Software Implementation of Fuzzy Neural Network Self-Learning Control Methods for Brushless DC Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015, 52, 414-424. https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2468191
6. Valeriy Druzhinin, Valerii Tytiuk, Petro Kurliak, Oleksii Chornyi, Galina Sivyakova, Alexey Kalinin, Victor Busher. (2025) Electric drive excitation control for improved performance of hot rolling mill finishing groups. ENERGETIKA. 2025, ISSN 0235-7208 eISSN 1822-8836, Lithuania, vol. 71. Nr. 1. P. 50–62 https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.4

КОМПЕНСАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ЗАВАД І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Романець А. О., аспірант
https://orcid.org/0009-0000-9893-8408
Запорізький національний університет

Анотація: *В роботі здійснено синтез активного компенсатора реактивної потужності і тестування його взаємодії з пристроєм плавного пуску в мережі живлення промислового ексгаустера. Показано, що розташування компенсатора між пристроєм плавного пуску і асинхронним двигуном вирішує низку задач: забезпечується повна компенсація реактивної потужності ексгаустера і стабілізація напруги у вузлу мережі з похибкою не більше –0.7…+0.4 %; діючи значення вищих гармонік напруги на протязі процесу пуску окрім першої 0.1с не превищують 2%; зменшення високочастотних складових напруги і струму призводить до видалення високочастотних коливань електромагнітного моменту; прибираються умови виникнення автоколивань електромагнітного моменту; розширюється діапазон регулювання кута відпирання тиристорів з 105…85 градусів до 120….40 градусів, що покращує керованість пристрою плавного пуску.*

Ключові слова: *пристрій плавного пуску, керований компенсатор реактивної потужності.*

COMPENSATION OF NETWORK INTERFERENCES AND REACTIVE POWER USING A HIGH-VOLTAGE SOFT STARTER

Romanets A., postgraduate student
https://orcid.org/0009-0005-7257-7671
Zaporizhzhia National University

Abstract: *The work has synthesized an active reactive power compensator and tested its interaction with a soft starter in the power supply network of an industrial exhaust fan. It has been shown that the location of the compensator between the soft starter and the asynchronous motor solves a number of problems: full compensation of the exhaust fan reactive power and voltage stabilization in the network node with an error of no more than –0.7…+0.4% is ensured; the effective values of higher voltage harmonics during the start-up process, except for the first 0.1s, do not exceed 2%; the reduction of high-frequency voltage and current components leads to the removal of high-frequency oscillations of the electromagnetic torque; the conditions for the occurrence of self-oscillations of the electromagnetic torque are removed; the range of adjustment of the thyristor opening angle is expanded from 105…85 degrees to 120….40 degrees, which improves the controllability of the soft starter.*

Keywords: *soft starter, controlled reactive power compensator.*

У сучасних системах розподілу електроенергії промислові навантаження не тільки споживають активну потужність, а й створюють значні потоки реактивної потужності, вносять гармонійні спотворення в напруги і струми. Ця ситуація пов'язана як з великою потужністю промислового обладнання, так і з широким використанням напівпровідникових перетворювачів. Поширення подібних пристроїв сприяє загальному загостренню проблем, пов'язаних із реактивною потужністю та зростанням вищих гармонік. Для розв'язання цих проблем і підвищення якості електроенергії впродовж багатьох років розробляли й удосконалювали силові активні фільтри електроенергії (APF)..

Мета роботи – синтез активного компенсатора реактивної потужності і тестування його взаємодії з пристроєм плавного пуску в мережі живлення промислового ексгаустера.

Найкращими регулювальними характеристиками володіє швидкодіючий реакторний компенсатор із широтно-імпульсним регулюванням на високій частоті (рис. 1). Основу схеми складають три індуктивні елементи LK і шість напівпровідникових ключів змінного струму (1-6), умовно представлених у вигляді контактів.

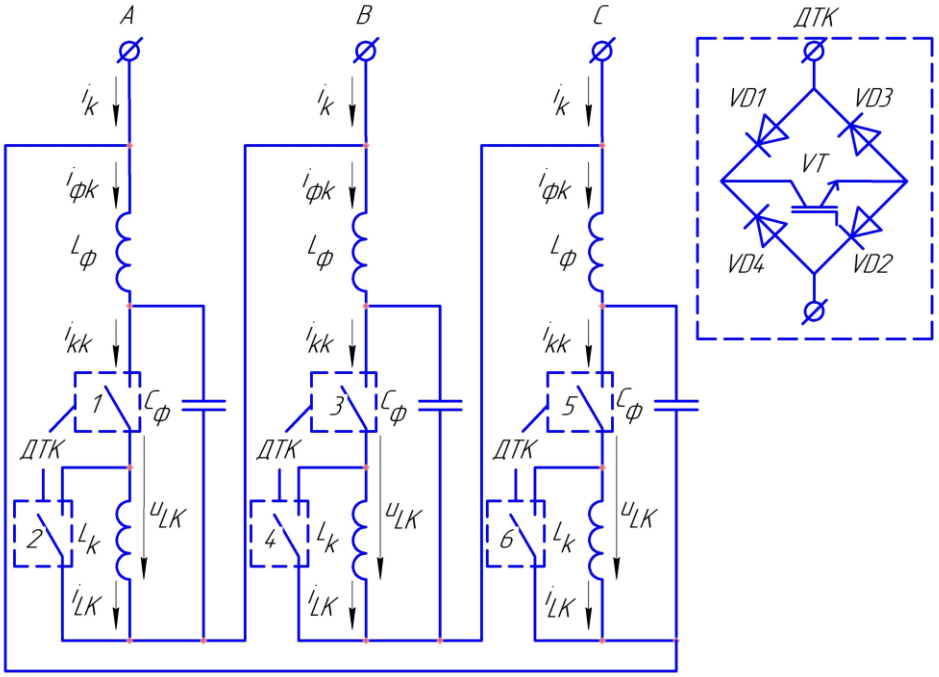


Рисунок 1 – Принципова схема трифазного керованого реакторного компенсатора

Вибір реактивних елементів компенсатора може бути виконаний приблизно за максимальною величиною реактивної потужності об'єкта QL з використанням розрахованої таблиці даних для 10 kV, 50 Hz (табл. 1) та формул для перерахунку для іншої напруги та частоти:

$$L_U = \frac{U^2}{10000^2} L_{10kV}; C_U = \frac{10000^2}{U^2} C_{10kV};$$
$$L_f = \frac{50}{f} L_{50Hz}; C_f = \frac{50}{f} C_{50Hz}; \quad (3)$$

Таблиця 1 – Параметри керованого компенсатора реактивної потужності (10 kV, 50 Hz)

QL, MVAR	C, μF	Lk, H	Lf, H	QL, MVAR	C, μF	Lk, H	Lf, H
0.5	10.9	0.2504	0.2940	5.5	119.8	0.0228	0.0267
1.0	21.8	0.1252	0.1470	6.0	130.6	0.0209	0.0245
1.5	32.7	0.0835	0.0980	6.5	141.5	0.0193	0.0226
2.0	43.5	0.0626	0.0735	7.0	152.4	0.0179	0.0210
2.5	54.4	0.0501	0.0588	7.5	163.3	0.0167	0.0196
3.0	65.3	0.0417	0.0490	8.0	174.2	0.0157	0.0184
3.5	76.2	0.0358	0.0420	8.5	185.1	0.0147	0.0173
4.0	87.1	0.0313	0.0368	9.0	196.0	0.0139	0.0163
4.5	98.0	0.0278	0.0327	9.5	206.9	0.0132	0.0155
5.0	108.9	0.0250	0.0294	10.0	217.7	0.0125	0.0147

Ключові елементи можуть бути реалізовані на базі мостової діоднотранзисторної схеми, в якої у діагоналі моста також замість IGBT можуть бути використаними двохопераційні тиристори (GTO, IGCT). У кожній фазі такої схеми реакторного компенсатора є два ключі, які працюють у протифазі: один із них з'єднаний послідовно, а інший - паралельно з LK.

Компенсатор реактивної потужності, крім силової частини, включає в себе систему керування компенсатором з ПІ-регулятора, вихідний сигнал якого g обмежений значен-

нями –1…+1 і двоканального PWM Generator, який формує протифазні сигнали керування ключами ДТК1, ДТК2 в кожному з трьох LLC блоків, а також датчик реактивної потужності.

Компенсатор може бути розташований в двох точках електричної принципової схеми:

- між мережевим трансформатором і пристроєм плавного пуску;
- між пристроєм плавного пуску і асинхронним двигуном.

Перший варіант підключення забезпечує компенсацію реактивної потужності і стабілізацію напруги у вузлу мережі, але не впливає на якість електричної енергії в приводі.

Для другого випадку модель силової частини виконано згідно з рис. 2.

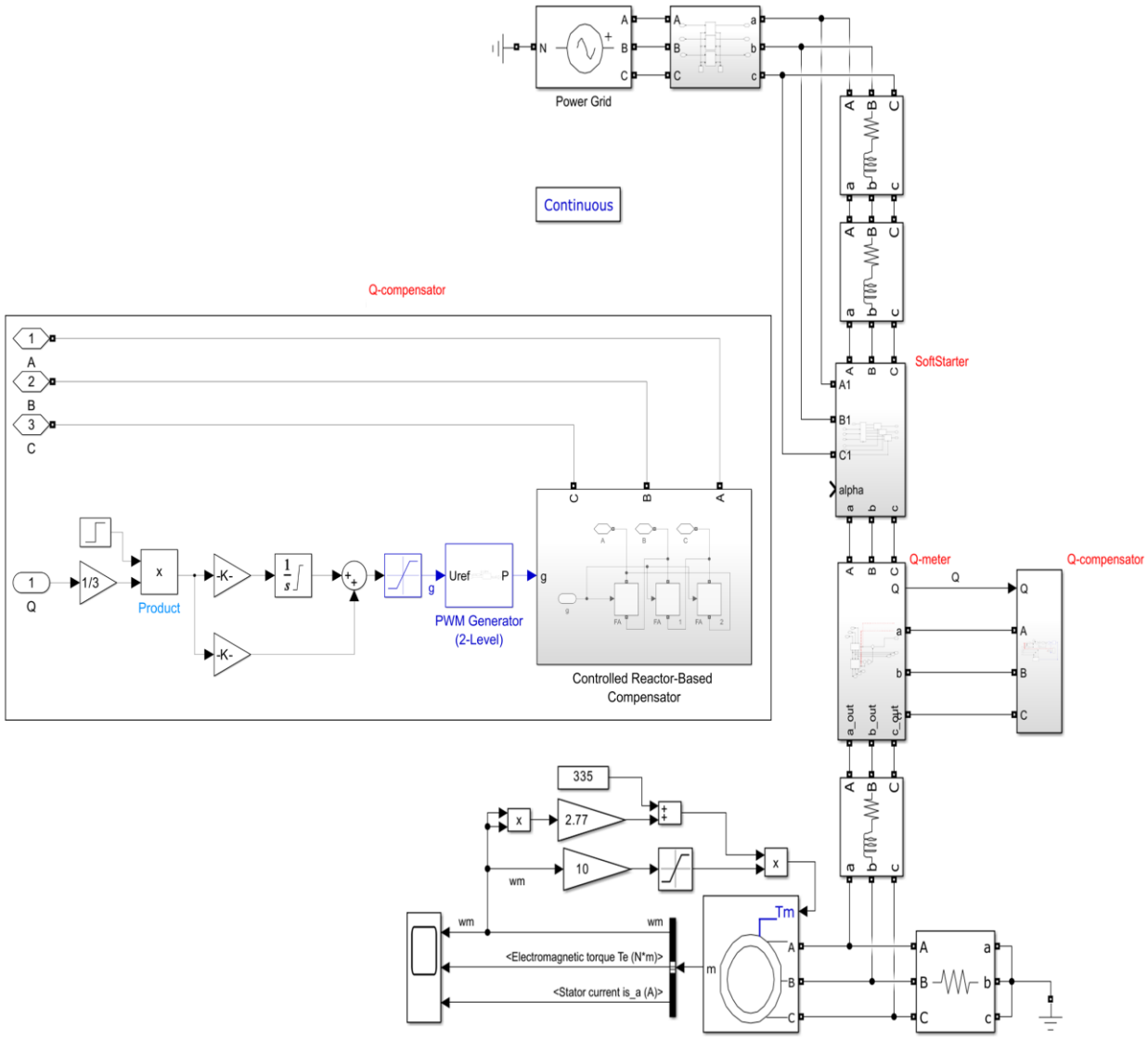


Рисунок 2 – Модель електроприводу ексгаустера з компенсатором реактивної потужності, розташованим між пристроєм плавного пуску та двигуном

В такій системі отримано перехідні процеси, графіки яких зображено на рис. 3.

Рис. 3,д дає уявлення про форму сигналу і розуміння того, що регулятор забезпечує повну компенсацію реактивної потужності окрім початку перехідного процесу і високочастотної складової, обумовленої комутацією тиристорів в пристрої плавного пуску.

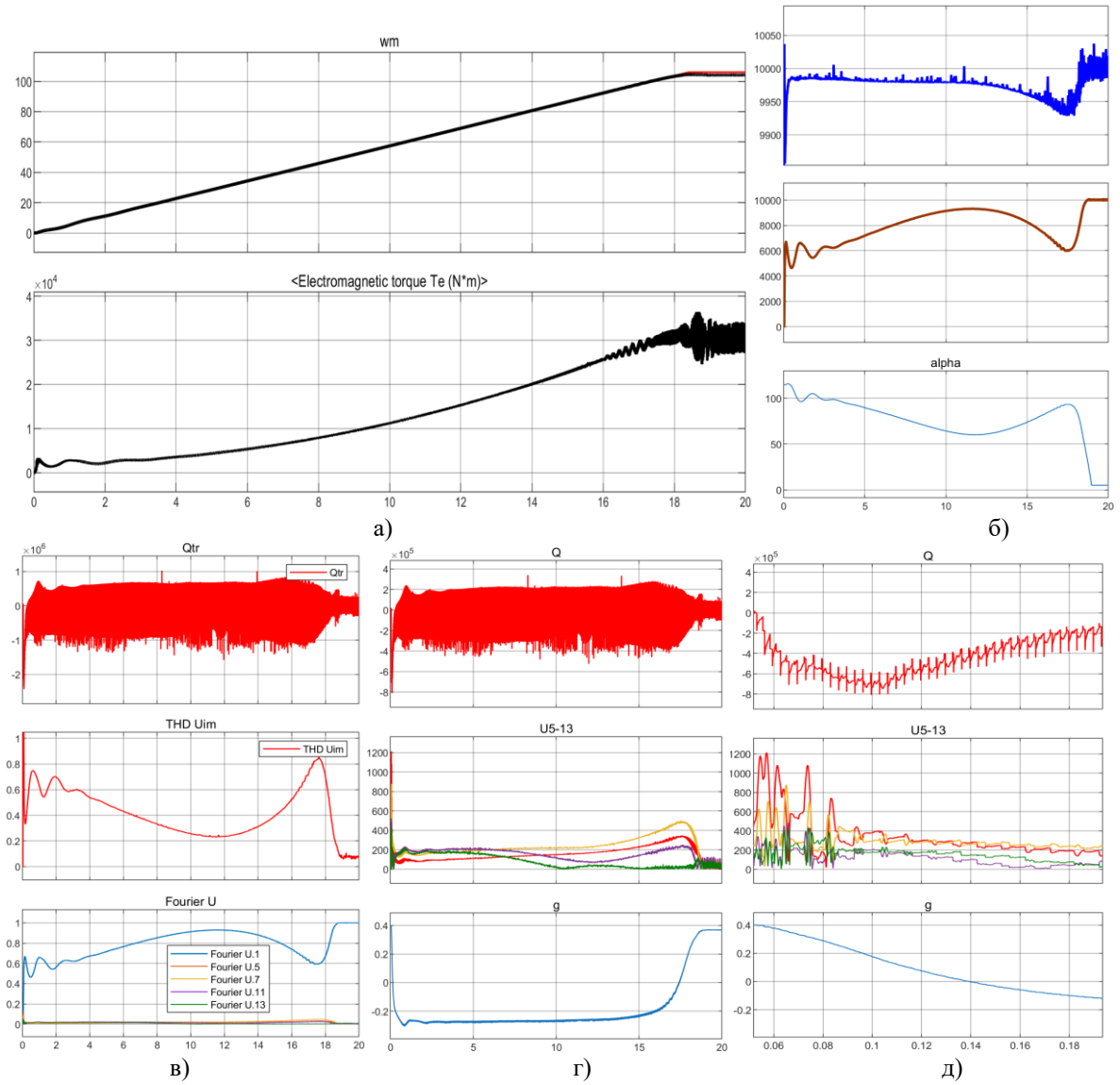


Рисунок 3 – Графіки перехідного процесу пуска ексгаустера:
а) швидкість та електромагнітний момент двигуна; б) напруга на виході трансформатора, напруга на обкладинках двигуна, кут відпирання тиристорів; в) реактивна потужність на виході трансформатора, THD і гармоніки напруги на обкладинках двигуна; г) реактивна потужність фази, вищі гармоніки напруги та сигнал керування компенсатором реактивної потужності; д) збільшений фрагмент перехідного процесу реактивної потужності фази і вищих гармонік напруги

Висновки. Використання керованого компенсатора реактивної потужності, розташованого між пристроєм плавного пуску і асинхронним двигуном вирішує низку задач:

– Забезпечується повна компенсація реактивної потужності, яка споживається електроприводом ексгаустера від мережі;

– Забезпечується стабілізація напруги у вузлу мережі з похибкою не більше – 0.7…+0.4 %;

– На протязі більшої частини перехідного процесу діючи значення вищих гармонік напруги не перевищують 2%, лише на початку перехідного процесу протягом 0.1с 5-а гармоніка сягає 12%, а наприкінці процесу – 7-а гармоніка сягає 6%, а 5-а – 4%;

– Зменшення високочастотних складових напруги і, відповідно, струму призводить до видалення високочастотних коливань електромагнітного моменту;

– Компенсація реактивної потужності прибирає умови виникнення автоколивань електромагнітного моменту асинхронного двигуна;

– Розширюється діапазон регулювання кута відпирання тиристорів з 105…85 градусів до 120….40 градусів, що покращує керованість пристрою плавного пуску.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yundi Chu, Xujun Luo, Shixi Hou, Juntao Fei. Robust hybrid intelligent control using probabilistic feature for active power filter, Control Engineering Practice, 2023, Volume 141, 105712, https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105712G

2. Захарченко В. М. Аналіз електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судновою мережею в динамічних режимах [Текст] / В. М. Захарченко, В. В. Бушер, О. В. Глазєва, К. Хандакжи // Електротехнічні та комп'ютерні системи – Київ, Техніка – Вип. 21(97). – С. 17–23. http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.21.97.2016.02

3. Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Харченко Р.Ю., к.т.н., доц.
https://orcid.org/0000-0003-3051-7513
Кочетков О.В., к.т.н., доц.
https://orcid.org/000-0001-8200-4897
Національний університет «Одеська морська академія»
Одеський національний морський університет

Анотація: *У статті розглянуто питання оцінки точності результатів моделювання при дослідженні перетворювачів постійної напруги (ППН), які широко застосовуються у сучасних системах електроживлення суднових та промислових пристроїв. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання, отриманих за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого на основі математичних моделей ППН, із результатами, одержаними у середовищі САПР Micro-Cap. Встановлено, що розбіжність результатів не перевищує 1%, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі реальним електричним процесам. Запропоноване програмне забезпечення забезпечує зручність дослідження енергетичних параметрів ППН і перевищує відомі системи моделювання за швидкодією та функціональністю при вирішенні спеціалізованих завдань аналізу електричних процесів.*

Ключові слова: *перетворювач постійної напруги; моделювання; САПР Micro-Cap; математична модель; точність розрахунків; електричні процеси; програмне забезпечення; енергетичні параметри; схема електроживлення; аналіз результатів.*

ACCURACY EVALUATION OF SIMULATION RESULTS IN THE STUDY OF DC-DC CONVERTERS

Kharchenko R.Yu., PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-3051-7513
Kochetkov O.V., PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0001-8200-4897
National University "Odesa Maritime Academy"
Odessa National Maritime University

Abstract: *he paper presents an evaluation of the accuracy of simulation results in the study of DC-DC converters (DCCs), which are widely used in modern power supply systems for marine and industrial equipment. A comparative analysis was carried out between the simulation results obtained using specialized software developed on the basis of mathematical models of DCCs and those obtained in the Micro-Cap CAD environment. It was found that the discrepancy between the results does not exceed 1%, confirming the adequacy of the developed mathematical model to real electrical processes. The proposed software provides convenient tools for studying the energy parameters of DCCs and surpasses known simulation systems in speed and functionality when solving specialized tasks related to the analysis of electrical processes.*

Keywords: *DC-DC converter; simulation; Micro-Cap CAD; mathematical model; calculation accuracy; electrical processes; software; energy parameters; power supply circuit; result analysis.*

Перетворювачі постійної напруги – ППН знаходять широке застосування в сучасних системах електроживлення суднових радіотехнічних пристроїв та телекомунікаційного обладнання, забезпечуючи надійну і ефективну роботу технологічного обладнання на

морських підприємствах, об'єктах енергетики, в суднових системах охоронної та пожежної сигналізації тощо [1].

Використання в ППН імпульсного принципу перетворення електричної енергії сприяє покращенню техніко-економічних показників джерел вторинного електроживлення (підвищення енергоефективності, зменшення габаритів та маси тощо). Тому дослідження електричних процесів і енергетичних параметрів перетворювачів постійної напруги сприятиме їх широкому використанню на практиці.

В даний час пріоритет у науково-дослідній сфері одержало віртуальне моделювання. Цей вид моделювання полягає в створенні віртуальної «моделі» і дослідженні електричної схеми за допомогою ЕОМ. Воно не потребує значних матеріальних витрат на створення макета, а також сприяє більш глибокому розумінню принципів роботи схеми яка досліджується, що не дозволяють в повній мірі зробити реальні макети.

Але будь-яке дослідження завжди потребує перевірки достовірності і точності отриманих результатів. Пропонується перевірити результати отримані при моделюванні за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення [2] з результатами, отриманими за допомогою відомої САПР.

На сьогодні у вітчизняній практиці найбільшого поширення набули системи та програмні комплекси автоматизованого проектування, наприклад, такі, як Electronic WorkBench, MathLab, MathCad, Micro-Cap. Дані системи дозволяють моделювати різні електротехнічні пристрої, виконувати аналіз часових залежностей з оперативним відображенням (у вигляді часових діаграм струмів і напруг), виконувати аналіз статичного та динамічного режимів роботи досліджуваної схеми та ін. [3].

Найбільш зручним для дослідження і проектування пристроїв та систем електроживлення, з погляду функціональних можливостей, буде розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, що дозволяє ефективно вирішувати завдання дослідження електричних процесів та енергетичних параметрів перетворювачів постійної напруги. Для оцінки точності результатів дослідження виконано порівняльний аналіз із результатами, отриманими під час використання відомої САПР Micro-Cap виробництва Spectrum Software [1]. Дана САПР володіє зручним графічним інтерфейсом, дозволяє аналізувати електричні процеси та отримувати часові діаграми струмів та напруг. Це є корисним при дослідженні й аналізі електричних процесів пристроїв електроживлення, так як це дозволяє наочно оцінити характер процесів, що відбуваються в елементах схеми, визначити миттєві значення струмів і напруг, їх максимальні і мінімальні значення й ін. Результати моделювання, отримані в САПР Micro-Cap, базуються на розв’язанні диференціальних рівнянь, що описують електричні процеси з дуже високим наближенням до тих, що реально відбуваються.

Однак, в САПР при моделюванні електричних процесів як окремо взятому силовому каналі, так і в ППН в цілому, були виявлені наступні обмеження (недоліки):

- При дослідженні силової частини перетворювачів складно моделювати схему управління, за якої буде забезпечений граничний режим у всьому діапазоні регулювання;

- Також обмежені можливості одночасно отримати результати для схеми з різними параметрами елементів (наприклад, коефіцієнт трансформації дроселів n_{21});

- Складність сполучення САПР Micro-Cap з іншими програмами (імпорт результатів моделювання в інші формати);

- Ускладнене дослідження показників якості, енергетичних параметрів ППН у всьому діапазоні регулювання (для кожного конкретного випадку доводиться створювати до-

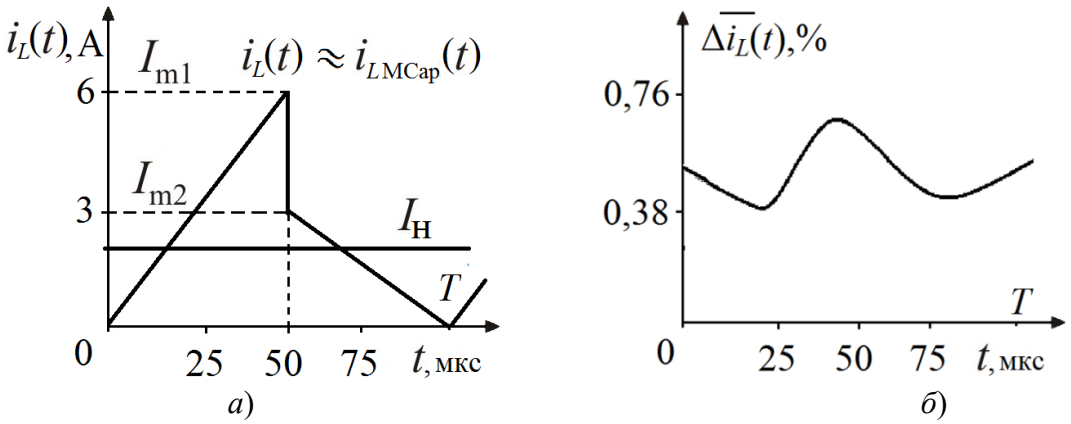
даткову модель і проводити окреме дослідження).

Зрештою зазначені обмеження зводяться до значних незручностей і як наслідок до значних додаткових витрат часу, порівняно з дослідженнями, за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення для вирішення такого класу завдань, що описане в [2].

Для перевірки точності розрахунків виконано порівняння результатів моделювання симетричних електричних процесів ППН, одержуваних за допомогою САПР Micro-Cap, та одержуваних за допомогою програмного забезпечення, створеного на базі розроблених математичних моделей і алгоритмів, викладених у [2]. На рисунку 1, *а* наведено результати моделювання – часова діаграма струму дроселя $i_L(t)$ у силовому каналі понижуючого типу за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення розробленого на основі розробленої математичної моделі й алгоритмів [2-4] . Порівнюючи її з такою самою залежністю $i_{L\ MCap}(t)$, отриманої з використанням програми Micro-Cap – (за тих самих вихідних даних) бачимо, що розбіжність результатів (рисунок 1, *б*) не перевищила 1%

$$-\Delta\bar{i}_L(t)=\left|\ i_L(t)-i_{L\ MCap}(t)\ \right|100/I_L\cdot \qquad (1)$$

А результати моделювання (рисунок 1, *а*) проведених за допомогою представленої в [2-4] математичної моделі і отримані з використанням програми Micro-Cap практично повністю збігаються.



а) *б)*

Рисунок 1 – Часові діаграми: струму $i_L(t)$ дроселя - (*а*), похибки результатів у відсотках Δi_L- (*б*) для СК понижуючого типу при коефіцієнті трансформації дроселя n_{21}=2

Висновки. Проведена оцінка точності результатів, отриманих за допомогою розробленої математичної моделі (рис. 1, *б*) показала, що розбіжність результатів не перевищила 1%.

Найбільші показники похибки спостерігаються в моменти перемикання силових комутуючих ключів. Отримані співвідношення дозволяють проводити необхідні розрахунки під час вирішення завдань дослідження та проектування перетворювачів зазначеного типу.

Розбіжність менше ніж 1% між результатами розрахунків свідчить про адекватність результатів отриманих при використанні розроблених математичних моделей і їх відповідність реальним електричним процесам. Розбіжність між результатами розрахунків пояснюється використанням в САПР Micro-Cap бібліотеки компонентів (силових комутуючих ключів, конденсаторів, дроселів, резисторів та ін.) з реальними характеристиками і

параметрами, на відміну від розробленої математичної моделі, де для зручності прийняті деякі припущення (параметри елементів ідеалізовані).

Тому можна зробити висновки, що вказане програмне забезпечення можна використовувати на практиці при проведенні комплексу досліджень перетворювачів постійної напруги для підвищення ефективності їх функціонування і широкому їх використанні на практиці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кочетков О.В. Методи автоматизованого дослідження перетворювачів постійної напруги / О.В.Кочетков // Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024). Odesa, Ukraine, May 15, 2024: proceedings. Odesa Military Academy, 2024. p. 39 – 40.

2. Кочетков О.В. , Машін В.М., Криворучко Д.Ю, Гаур Т.О., Дранчук С.М., Харченко Р.Ю./ Алгоритми автоматизованого дослідження перетворювачів постійної напруги модульної структури// Вісник Одеського національного морського університету, № 3 (77), 2025, С. 117 – 128.

3. Kharchenko, R. Y., Kochetkov, A. V., & Mikhaylenko, V. S. (2022). Analysis of methods for automated research of dc voltage converters of modular structure . *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 7. P. 7-21.

4. Kharchenko R.Yu. Methods for automated research of dc voltage converters/ R.Yu. Kharchenko, V.A Zavadskiy., A. V. Kochetkov // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2022 - 23.11.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2023. – 203 С.85 – 89.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРУ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ТА ПРОБЛЕМИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Гвоздева І.М. , д. т. н., професор
https://orcid.org/ 0000- 0001- 5797- 0559
Миргород В.Ф., д. т. н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-8361-1672
Грама Г.П., кандидат педагогічних наук
https://orcid.org/ 0009-0001-6032-9196
Кольцов Г.С., студент
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Пропонується підхід до удосконалення суднових електроенергетичних систем шляхом обґрунтування методів пуску електроприводу із урахуванням вимог до динамічних процесів у компресорі пускового повітря для забезпечення головного завдання – пуску головного двигуна. Запуск головного двигуна за допомогою компресора пускового повітря супроводжується значними моментами статичного та динамічного навантаження, що потребує обґрунтування відповідних методів пуску електроприводу. Розглянуті характеристики сучасних методів пуску асинхронного електроприводу, їх переваги та недоліки. Вирішено прикладне завдання аналізу енергетичних процесів в компресорі пускового повітря HV2/285A та пропонованих технічних рішень плавного пуску електроприводу. Проведені дослідження та комп'ютерне моделювання пускових режимів електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна за різними методами. Розроблена експертна система нечіткої логіки для забезпечення експлуатації компресора пускового повітря головного двигуна. Встановлено, що застосування методів інтелектуального управління надає можливість удосконалення процесів пуску та експлуатації компресора пускового повітря.*

Ключові слова: *суднова електроенергетична система, компресорі пускового повітря, асинхронний електропривод, нечітка логіка, технічний стан.*

MODELING OF TRANSIENT MODES OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE MAIN ENGINE STARTING AIR COMPRESSOR AND IMPLEMENTATION PROBLEMS

Gvozdeva I.M., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/ 0000- 0001- 5797- 0559
Myrgorod V.F., Dr. of Science, Associate professor
https://orcid.org/0000-0001-8361-1672
Grama G.P., Candidate of Pedagogical Sciences
https://orcid.org/ 0000-0003-3229-1909
Koltsov G.S., Student
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *An approach to improving ship electric power systems is proposed by substantiating the methods of starting the electric drive, taking into account the requirements for dynamic processes in the starting air compressor to ensure the main task - starting the main engine. Starting the main engine using the starting air compressor is accompanied by significant moments of static and dynamic load, which requires substantiation of the corresponding methods of starting the electric drive. The characteristics of modern methods of starting an asynchronous electric drive, their advantages and disadvantages are considered. The applied task of analyzing energy processes in the HV2/285A starting air compressor and the proposed technical solutions for smooth starting of the electric drive is solved. Research and computer modeling of the starting modes of the electric drive of the starting air compressor of the main engine using various methods have been conducted. An expert system of fuzzy logic has been developed to ensure the operation of the starting air compressor of the main engine. It has been established that the use of intelligent control methods provides an opportunity to improve the processes of starting and operation.*

Keywords*: ship electrical power system, starting air compressors, asynchronous electric drive, fuzzy logic, technical condition.*

Сучасні вимоги до рівня досконалості технічних рішень автоматизації суднових систем потребують віднайдення таких засобів автоматизації, які мають найкращі техніко-економічні показники та забезпечують вирішення поставлених завдань найбільш досконалими методами. Однією із важливих складових суднових систем є сукупність пристроїв запуску головного двигуна за допомогою компресору пускового повітря. Такий компресор є складним технічним пристроєм і його рух забезпечується відповідним електроприводом, керування яким потребує специфічних особливостей, зумовлених особливостями руху об'єкту. Найбільш важливим питанням є забезпечення відповідних процесів пуску електроприводу із урахуванням вимог до динамічних процесів для забезпечення головного завдання – пуску головного двигуна. Запуск головного двигуна за допомогою компресора пускового повітря, який виконується за допомогою керованого електроприводу, супроводжується значними моментами статичного та динамічного навантаження, що потребує обґрунтування відповідних методів пуску електроприводу. Найбільш важливою проблемою обґрунтування таких методів є забезпечення допустимого перенавантаження електроприводу по пусковому струму.

Експлуатаційний період функціонування компресору пускового повітря потребує відповідних програмно-алгоритмічних рішень, які зумовлені невизначеністю деяких умов вихідних даних. Тому забезпечення експлуатаційного періоду є важливим питанням, яке потребує вирішення за допомогою сучасних технологій штучного інтелекту. Звідси, удосконалення процесів управління у електроприводі суднового компресора пускового повітря та оцінки його технічного стану на протязі довготривалої експлуатації, є актуальною науково-технічною проблемою.

Метою роботи є вирішення протиріччя між затребуваними практикою вимогами до систем управління електроприводом компресора пускового повітря і його експлуатації та можливостями таких систем, що використовуються в судновому обладнанні, шляхом встановлення методів та засобів удосконалення пускових режимів та інтелектуальних технологій обслуговування експлуатаційних режимів.

В поточний час, у якості електроприводу компресорів пускового повітря на суднах широко застосовуються електроприводи, основною частиною яких є асинхронні двигуни (АД). При прямому пуску потужного АД великий початковий пусковий струм може викликати значні термічні навантаження обмотки. Значні коливання моменту двигуна на початковому етапі запуску, які можуть перевищувати 4-5 кратне значення номінального моменту, створюють несприятливі умови до роботи механіки компресору.

На практиці широко застосовується автотрансформаторний пуск або пуск "зірка - трикутник". Такі рішення дозволяють обмежити величину початкових кидків пускового струму, проте повною мірою не усувають проблему коливань пускового моменту і не вирішують завдання формування необхідної для конкретного механізму пускової характеристики (формування кривої швидкості при пуску).

Повністю усунути перераховані вище проблеми можливо, якщо здійснювати плавний пуск асинхрониого двигуна. Сучасні засоби перетворювальної техніки дозволяють використовувати наступні методи керування двигуном при його пуску:

– плавне наростання напруги при фіксованій частоті живлення та формування необхідної кривої швидкості, що забезпечується плавними пускачами на базі тиристорних регуляторів напруги;

– частотне регулювання: зміна напруги і частоти із застосуванням перетворювача частоти;

– векторне керування електроприводом: зміна частоти і фази із застосуванням моделі АД.

Вказані пристрої, крім виконання основного завдання, а саме, забезпечення плавного пуску, реалізують у повній мірі завдання захисту двигуна і механізму компресора. Економічна доцільність застосування того чи іншого пристрою полягає у підвищені надійності, збільшенні терміну служби обладнання та збільшення міжремонтного періоду.

Проте застосування дорогих перетворювачів частоти та пристроїв векторного керування не завжди економічно і технічно обґрунтовано, оскільки більшість їх функцій реалізують більш дешеві та зручні в експлуатації пристрої плавного пуску (ППП).

Пристрій плавного пуску (ППП) краще застосовувати для вирішення завдань, коли відсутня необхідність регулювання швидкості обертання електроприводу. Пристрій плавного пуску має в 4 - 5 більші перевантажувальні характеристики. Такий пристрій дозволяє плавно збільшувати струм та зміну обертів двигуна з нульового значення.

Наприклад, пристрій плавного пуску Altistart 48 за принципом роботи є тиристорним регулятором напруги [1]. Для реалізації плавного пуску асинхронного двигуна повинна формуватися крива наростання напруги, що прикладається до обмотки статора. Для вирішення цього завдання більшість виробників пристроїв плавного пуску застосовують задавачі лінійного наростання напруги з можливістю завдання та регулювання темпу наростання, та/або здійснюють обмеження пускового струму двигуна на заданому рівні (2-5-кратне значення). Пристрій Altistart 48 використовує, крім вище наведеного принципу, інший підхід: регулювання пускового моменту шляхом створення замкнутої системи автоматичного регулювання (САР) моменту двигуна та формування від задавача інтенсивності необхідної кривої зміни моменту. Тому вдається реалізувати лінійний характер наростання швидкості широкого класу механізмів, у тому числі – компресорів пускового повітря. Пристрій Altistart 48 також дозволяє реалізувати контрольований процес гальмування (зупинки) механізму.

Основний недолік пристроїв плавного пуску на основі тиристорних регуляторів напруги – низьке значення початкового пускового моменту двигуна (0,1 – 1,0 Мн). Це може створити проблеми для забезпечення пуску механізмів із значним моментом опору під час рушання з місця.

Таким чином, застосування пристроїв плавного пуску в електроприводах з асинхронним електродвигуном дає значні переваги, що дозволяє організувати ефективний пуск двигуна та зменшити кількість виходів з ладу таких систем.

Широке застосування у світовій практиці отримав частотно-регульований електропривод із асинхронним двигуном [2,3,4]. Частотне регулювання швидкості обертання валу асинхронного двигуна здійснюється за допомогою електронного пристрою, який називається частотним перетворювачем. Вищевказаний ефект досягається шляхом зміни частоти та амплітуди трифазної напруги, що надходить на електродвигун. Таким чином, змінюючи параметри напруги живлення (частотне управління), можна робити швидкість обертання двигуна, як нижче, так і вище номінального значення. Застосування частотних перетворювачів дозволяє зробити плавний пуск двигуна, що значно зменшує його зношування і дозволяє підвищити ресурс обладнання, мати максимальний пусковий момент на валу електричного двигуна, отримати можливість дистанційної діагностики приводу по промисловій мережі.

Сучасний перетворювач частоти типу Altivar виконується зі ланкою постійного струму та вихідним інвертором на базі IGBT транзисторів [http://www.ems.org.ua/articles_3.shtml]. Він є завершеним комплектним пристроєм, призначеним для створення регульованого асинхронного електроприводу та вирішення завдань плавного пуску та гальмування, регулювання моменту, швидкості двигуна та технологічних параметрів. Основна перевага Altivar – це високий пусковий момент (1,5 – 1,8 Мн) і можливість формування плавного наростання і спадання швидкості за наперед обраним законом (лінійне наростання, S-, U-подібні криві швидкості).

У найпоширеніших частотних перетворювачах (ЧП), що використовуються для керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, застосовується скалярне та векторне частотне керування.

При скалярному управлінні за певним законом змінюють амплітуду та частоту доданої до двигуна напруги. Причому, не можна змінювати тільки частоту напруги живлення, так як це призведе до відхилення від розрахункових значень максимального, пускового моментів двигуна, ККД та коефіцієнта потужності Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно, відповідно, змінити амплітуду напруги. У існу-

ючих частотних перетворювачах, використовуючи метод скалярного управління, при зміні частоти амплітуда напруги змінюється таким чином, що відношення максимального моменту двигуна до поточного моменту навантаження залишається незмінним. Таке відношення називається перевантажувальною здатністю двигуна. При незмінності перевантажувальної здатності номінальні коефіцієнт потужності та ККД двигуна у всьому діапазоні регулювання частоти обертання мало змінюються.

При векторному керуванні струм двигуна поділяють на два вектори: один із них виробляє потік намагнічування, а інший утворює крутний момент, кожен з яких регулюється окремо. Обертальний момент визначається струмом статора, який створює збуджуюче магнітне поле. При безпосередньому управлінні моментом необхідно змінювати не тільки амплітуду, але і вектор струму, яким є фаза статорного струму. Для управління вектором струму та положенням магнітного потоку статора відносно ротора, що обертається, потрібно знати точне положення ротора в будь-який момент часу. Завдання вирішується або за допомогою датчика положення ротора, або визначенням положення ротора шляхом обчислень по струмах та напруги статорних обмоток. Векторне управління забезпечує високу швидкодію та точність управління швидкістю електродвигуна та крутного моменту. Також воно дозволяє суттєво збільшити діапазон управління, точність регулювання та підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує безпосереднє керування крутним моментом двигуна.

В процесі дослідження виконано аналіз вказаних методів плавного пуску АД електроприводу компресору пускового повітря аналітичним обґрунтуванням та обчислювальними розрахунками засобами математичного моделювання.

Висновки. Основними висновками є наступні:

На основі проведеного аналізу методів та пристроїв плавного пуску асинхронних електроприводів суднових компресорів пускового повітря головного двигуна виявлені альтернативні та конкуруючі підходи щодо вирішення поставленого завдання: використання достатньо простих спеціалізованих пристроїв плавного пуску та застосування універсальних, але достатньо складних, засобів частотного регульованого електроприводу.

На основі вимог до технічного обслуговування компресору пускового повітря обґрунтована можливість та необхідність побудови нечіткої експертної системи для порад оператору.

Результати роботи загалом дозволяють обґрунтувати загальний висновок, що впровадження сукупності методів, методичних основ та програмно-алгоритмічних засобів управління електроприводом компресора пускового повітря і його експлуатації дозволяє вирішити завдання удосконалення пускових режимів та покращення обслуговування експлуатаційних режимів за рахунок інтелектуальних технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Електронний ресурс. Режим доступу: http://www.ems.org.ua/articles_3.shtml.

2. A. Vyngra, B. Avdeyev, Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit. // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. (FarEastCon), 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.

3. Chernyi, S., Vyngra, A., Erofeev, P., & Novak, B. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems // Procedia Computer Science, (2020). 167, 2164-2171. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266.

4. Моделювння електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.

Секція 8. АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ МАС У БАЛАСТНИХ ТАНКАХ НАПІВЗАГЛИБНИХ СУДЕН

[1]**Палагін О. М.,** к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-6533-5894
[2]**Сандлер А.К**., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-0709-0542
[3]**Глазєва О.В.,** к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4992-7697
[1] Дунайський інститут Національного університета "Одеська морська академія"
[2, 3] Національний університет "Одеська морська академія"

Анотація. *Забезпечення надійності та безпеки роботи напівзаглиблених суден є основним завданням під час проєктування та створення об'єктів морської галузі, що визначає їх подальше використання у виробничому циклі. Сучасні конструкції характеризуються високим рівнем технічної досконалості та мають достатній запас механічної міцності в процесі експлуатації. Однак аналіз аварійності показує, що втрата остійності залишається основною проблемою протягом багатьох років. Тому постає питання про впровадження інноваційних інженерно-технічних рішень щодо забезпечення додаткового контролю стану баласту суден цього типу.*

Ключові слова: *напівзаглиблене судно, повітряні міхури, оптичне волокно, грати Брегга.*

AUTOMATED FIBER-OPTIC DEVICE FOR MONITORING AIR MASSES IN BALLAST TANKS OF SEMI-SUBMERSIBLE VESSELS

[1]**Palagin Oleksandr**, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-6533-5894
[2]**Sandler Albert**, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-0709-0542
[3]**Glazeva Oksana**, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-4992-7697
[1]Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy"
[2,3]National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract. *Ensuring the reliability and safety of semi-submersible vessels is the main task during the design and creation of marine facilities, which determines their further use in the production cycle. Modern designs are characterized by a high level of technical perfection and have a sufficient margin of mechanical strength during operation. However, accident analysis shows that the loss of stability remains the main problem for many years. Therefore, the question arises of implementing innovative engineering and technical solutions to ensure additional control of the ballast condition of vessels of this type.*

Keywords: *semi-submersible vessels, air bubbles, optical fiber, Bragg grating.*

У морському транспорті судна напівзаглибного типу (semi-submersible vessels) вирізняються унікальними конструктивними особливостями. Вони належать до найбільших засобів водного транспорту в морській галузі та становлять окремий клас суден у сфері вантажоперевезень. Основне їх призначення — транспортування нестандартних великогабаритних і великовагових вантажів, таких як бурові платформи, судна чи заводські залізобетонні конструкції. Оскільки кожен вантаж має індивідуальні характеристики й рідко повторюється, умови його розміщення на палубі та спосіб кріплення завжди визначаються окремо. Це висуває особливі вимоги до забезпечення остійності судна, швидкості оптимального руху та технологічних процесів навантаження й розвантаження.

Основна складність при експлуатації напівзаглибних суден великої вантажопідйомності полягає в точному контролі диференту. Це критично важливо для безпеки й стабільності судна (рис. 1).

Рисунок 1 – Конструктивне виконання напівзаглибного судна типа SEMI–SUBMERSIBLE HEAVY–LIFT

Єдиний спосіб керування диферентом у цьому випадку – це комбіноване баластування, що включає попереднє й основне заповнення баластних танків. Процес цей складний і вимагає граничної точності. Попереднє й основне баластування – це послідовне заповнення певних танків морською водою з дотриманням суворої послідовності й швидкості. Зміна диференту й крену відбувається безупинно, що вимагає тонкого настроювання процесу. Для закачування води використовуються потужні суднові насоси. На початку занурення або спливання, до досягнення необхідного рівня заповнення танків, насоси працюють у байпасному режимі. Часті пуски й зупинки при малих змінах диференту привели би до швидкого зношування й виходу з ладу насосного встаткування. Постійне включення й вимикання насосів, особливо при заповненні кормових і носових танків, чревате серйозними аваріями. Подача насосів у байпасному режимі звичайно становить 50 … 60% від максимальної продуктивності й регулюється за допомогою гідравлічної системи судна.

Повне заповнення танків завжди супроводжується утвором повітряних кишень. Це неминуче явище, і ці повітряні міхури являють собою об`єми повітря, що постійно рухаються та сковзають по поверхні води в танках. Їхній обсяг може досягати 10% від загального об`єму танка. У танках об`ємом 3600 … 6720 м³, це означає наявність повітряних кишень розміром 360 … 672 м³, що є значним об`ємом.

Важливо відзначити, що рух величезних повітряних міхурів усередині танків не залежить від хвилювання моря або сили вітру, воно носить випадковий характер, але суттєво впливає на остійність судна. Це приводить до неконтрольованих коливань, збільшуючи ризик аварійної ситуації.

Тому передбачити умови, які можуть привести до резонансу й, як наслідок, до перекидання судна, практично неможливо. Середня площа поверхні баластних танків становить 300 … 560 м². Усунення паразитного повітря за допомогою стандартних переливних клапанів не завжди ефективно. Траєкторія руху повітряного міхура може не збігатися з

місцем розташування клапанів, що приводить до їхнього обходу й збереженню повітряної пробки в танку. Проблема збільшується тим, що навіть невеликі зміни в розподілі ваги усередині танків, викликані рухом повітряних кишень, можуть привести до значних змін диференту. Це вимагає від екіпажу постійного моніторингу й коректування процесу баластування, що є вкрай трудомістким процесом, який вимагає високої кваліфікації й досвіду. Необхідна постійна взаємодія між командою, відповідальною за баластування, і командою, що контролює положення судна. Будь-яка затримка або помилка в керуванні процесом може привести до серйозних наслідків.

Тому системи моніторингу й автоматизації баластування постійно удосконалюються, прагнучі мінімізувати людський фактор і підвищити безпеку експлуатації напівзаглибних суден. Однак повне усунення ризику неможливо, і потрібні постійні дослідження й розробка нових методів керування диферентом та технічних засобів контролю обсягів повітря за об`ємом баластних танків [1 - 9].

Світовий досвід свідчить про те, що ефективним може бути застосування гідроакустичних систем контролю, що ґрунтується на класичних гідрофонах.

Впровадження та обслуговування елементів подібних систем контролю потребує суттєвих фінансових ресурсів. Тому для суднових потреб раціонально використовувати системи, що мають кращі показники за критерієм "вартість/ ефективність".

Найкраще вимогам до контролю обсягів повітря в баластних танках відповідають інтелектуальні розподілені інформаційно-вимірювальні системи. (ІРІВС). Основу ІРІВС складає комплекс вимірювальних пристроїв, які дозволяють отримувати в реальному часі достовірну картину про стан контрольованих об'єктів і процесів, які відбуваються в них. ІРІВС істотно відрізняються від раніше створених аналогів, у яких фізичні величини вимірювалися незалежно один від одного окремими вимірювальними приладами в окремих точках. Головна відмінність полягає в тому, що здійснюється одночасне та інтегроване порівняння контрольованих фізичних величин, визначаються їх розподіли та закономірності взаємодії.

Принцип дії ІРІВС ґрунтується на застосуванні томографічного підходу в їхній структурній організації та реконструкції просторової функції розподілу вимірюваних фізичних параметрів, а також на використанні нейронних мереж для обробки отриманих даних. Основою елементної бази таких систем є волоконно-оптичні компоненти. Характеристики випромінювання, що поширюється вздовж оптичного волокна в системі, змінюються залежно від характеристик фізичних полів, які впливають, а сигнал на виході вимірювальної лінії являє собою лінійний інтеграл від функції розподілу досліджуваного параметра фізичного поля. Математично це класична томографічна задача, оскільки для досліджуваних полів кількість інформаційних каналів є меншою, ніж кількість необхідних рішень [10, 11].

Але існуючим ІРІВС притаманна низька чутливість у зоні акустичних полів, що створюються повітряними міхурами у баластних водах.

Для пошуку шляхів вдосконалення ІРІВС проаналізовані сучасні гідроакустичні датчики [12].

Найбільш перспективними для вирішення завдання контролю обсягів повітря у баластних танках є волоконно-оптичні, зокрема плазмонні датчики [13–15].

В основі роботи цих датчиків лежить унікальна комбінація похилої внутрішньоволоконної бреггівської ґратки (TFBG – Tilted Fiber Bragg Grating) та плазмонного ефекту. Саме ця комбінація забезпечує високу точність визначення спектрального положення резонансу, що перевершує показники інших конструкцій. Принцип дії заснований на порушенні TFBG мод оболонки оптичного волокна.

Ці моди мають еванесцентні поля, які проникають за межі серцевини волокна й безпосередньо взаємодіють із навколишнім середовищем. Для посилення цієї взаємодії на поверхню ділянки волокна, де записані ґратки, наноситься тонкий шар металу (товщиною

30–50 нм), що має плазмонні властивості. Цей шар, по суті, є ключовим елементом датчика. Вихідні з волокна оболонкові моди, які взаємодіють із металізованою поверхнею, збуджують поверхневі плазмони – колективні коливання електронів у металі. Критично важливою характеристикою цих плазмонів є їхня швидкість поширення, яка прямо залежить від діелектричної проникності навколишнього середовища. Найефективніше енергія оболонкових мод переходить в енергію плазмонів, коли фазова швидкість поширення моди уздовж поверхні волокна збігається зі швидкістю поширення плазмона. Це явище, відоме як поверхневий плазмонний резонанс, чітко проявляється в спектрі пропускання датчика у вигляді характерної «перетяжки» – різкого провалу в інтенсивності випромінювання. Ключова перевага полягає в тому, що спектральне положення цієї «перетяжки» безпосередньо пов'язане з показником заломлення середовища, яке оточує оптоволокно, що дозволяє використовувати датчик для вимірювання різних параметрів навколишнього середовища (рис. 2). [16].

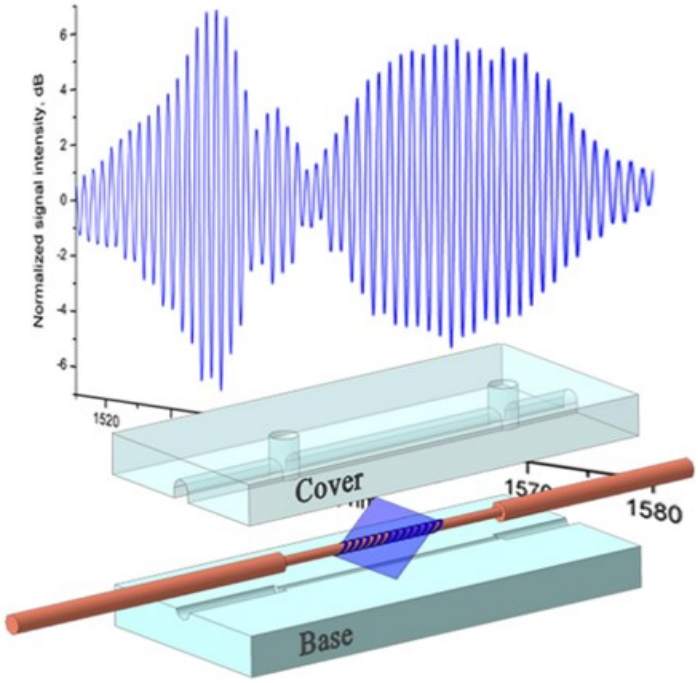


Рисунок 2 – Схема плазмонного волоконно-оптичного датчика та його спектр пропускання

Однак удосконалення цієї технології стикається з серйозними труднощами. Основна проблема полягає у сильній залежності спектра вихідного сигналу від поляризації вхідного випромінювання.

У конструкції з використанням похилих бреггівських ґрат лише один компонент лінійної поляризації ефективно збуджує плазмони. Другий компонент, який не бере участі у плазмонному резонансі, не викликає «перетяжки» у спектрі пропускання. Це призводить до значного зниження контрасту в результуючому спектрі й, як наслідок, до розмиття положення резонансу та зменшення точності вимірювань.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що зовнішні фактори, такі як механічні напруження (наприклад, вигин волокна) або температурні коливання, можуть спричиняти перетікання енергії між поляризаційними складовими сигналу. Це додатково розмиває резонанс і робить вихідний сигнал нестабільним та непередбачуваним. Подібна нестабільність істотно обмежує застосування датчиків цього типу в різних галузях.

Відомі технічні рішення намагаються подолати цю проблему шляхом використання додаткових пристроїв для контролю та керування поляризацією збуджуваного випромінювання.

Наприклад, у патенті [17] пропонується використовувати поляризаційну призму. Однак включення до схеми додаткового оптичного елемента створює низку серйозних недоліків. Це збільшує габарити датчика, знижує його енергетичну ефективність і ускладнює конструкцію, що робить його непридатним для застосування в задачах, які потребують компактності та швидкості аналізу.

Проблема передачі випромінювання між призмою та оптичним волокном також становить складне інженерне завдання. Необхідність точної юстування та співвісності елементів значно ускладнює виробництво й експлуатацію такого датчика.

Волоконно-оптичний плазмонний датчик [18, 19] вирішує цю проблему іншим способом.

Конструкція чутливого елемента складається з послідовно з'єднаних багатомодового (MMF), одномодового (SMF) та багатомодового волокна зі структурою MMF–SMF–MMF. Ділянка MMF-волокна-поляризатора ефективно придушує небажаний поляризаційний компонент випромінювання, перш ніж воно досягне чутливого елемента. Чутливе SMF-волокно, у свою чергу, являє собою світловод із похилими бреггівськими ґратами, на поверхню якого нанесено тонкий шар плазмонного металу. Загалом у датчику присутні два сполучення одномодового та багатомодового волокна.

Згідно з теоремою Ліувілля та законом яскравості, хвилеводна структура, що має M1 мод, які поширюються, може зібрати не більше ніж M1 мод, випромінюваних збуджувальною хвилеводною структурою з числом мод M0. Цей результат не залежить від типу оптичного зв'язку між хвилеводними структурами. Це дає підстави розглядати, у загальному випадку, задачу узгодження двох хвилеводних структур як збурення приймальної антени деяким заданим полем випромінювальної антени. За однакової поляризації електричних полів хвиля, що збуджує $\psi 1$, і хвиля, яка збуджується $\psi 2$, та за неширокої діаграми спрямованості випромінювальної й приймальної апертур у наближенні, еквівалентному наближенню Кірхгофа, ефективність узгодження хвилеводних структур за потужністю η є:

$$\eta = Tr\eta_0,$$

де Tr – коефіцієнт пропущення; $\eta_0 = \left|\int \psi_1 \psi_2 ds\right|^2$ – ефективність перекриття, що полів, яке збуджує ψ_0 і поля, яке збуджується ψ_1, нормованих таким чином, що: $\int |\psi_1| ds = 1$ і $\int |\psi_2| ds = 1$ [13].

Тобто у зазначеному датчику подібні сполучення являють собою суттєво нерегулярні оптичні ділянки. Аналіз та розрахунки їх викликають великі труднощі, пов'язані з появою хвиль, які випромінюються, в осередках нерегулярності.

Крім того, металева наноструктура для індукування плазмонних ефектів, що вкриває чутливе SMF-волокно, виконана із золота. Однак висока вартість золота перешкоджає комерціалізації продуктів з використанням плазмонних наноструктур. З іншого боку, мідь є кращим матеріалом для недорогої плазмоніки [19]. Ціни на золото у кілька порядків вищі, ніж на мідь. Мідь, однак, як і раніше має добрі плазмонні властивості у видимому діапазоні довжин хвиль. Найсерйознішою проблемою використання наноструктур міді є те, що вони легко окислюються в умовах навколишнього середовища [20].

З огляду на ці обставини, у плазмонному датчику повітряних міхурів у баластових водах запропоновано такі зміни. Замість поляризаційної призми та структури MMF–SMF–MMF для сполучення волокон пропонується застосувати оптичний фокон-поляризатор. При використанні фокона хвилеводний перехід від одного волокна до іншого з іншим діаметром перетворює кожну хвилеводну моду первинного волокна у відповідну моду вторинного. Постійні поширення на такому переході змінюються повільно. У цьому випадку перетворення мод практично не відбувається, і оптична потужність первинного світловода повністю переходить у відповідну моду вторинного волокна.

Що стосується металізованого покриття чутливого волокна, то пропонується засто-

сувати менш коштовний сплав срібла та міді. Плазмонні властивості цього сплаву являють собою цікавий компроміс між високою плазмонною активністю срібла та більш слабкою, але термічно стійкою природою міді. Срібло має найкращі плазмонні властивості серед металів завдяки низьким втратам і високій добротності поверхневих плазмонів у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні. Мідь має схожу електронну структуру, але характеризується більшими втратами, особливо в ультрафіолетовому діапазоні, через міжзонні переходи. Сплав демонструє проміжні властивості: добротність плазмонів нижча, ніж у чистого срібла, але вища, ніж у міді. Це робить його придатним для завдань, де потрібен баланс між оптичними властивостями та механічною/термічною стабільністю. При домінуванні срібла зберігається висока добротність і вузький плазмонний пік.

Використання фокона-поляризатора та покриття зі сплаву срібла й міді дозволяє значно поліпшити стабільність і точність роботи датчика, усунувши вплив небажаної поляризації на спектральні характеристики. Це дає змогу створити більш компактний, надійний і зручний у застосуванні датчик. Відсутність додаткових оптичних елементів спрощує конструкцію, підвищує надійність і знижує вартість виробництва. Крім того, датчик запропонованої конструкції може бути виготовлений з альтернативних скломатеріалів та легко інтегрований у ІРІВС поряд з іншими датчиками, що контролюють параметри робочих середовищ, які використовуються на суднах [21–25].

ЛІТЕРАТУРА

1. Палагін, О. М. Вдосконалення системи вивантаження баластної води на погружних морських суднах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Національний університет "Одеська морська академія". – Одеса, 2019. – 20 с.
2. Палагин, А. Н. Основные принципы новой технологии проведения балластных операций на судах погружного типа // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 2(57). – С. 221-229.
3. Malahov, A. Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 3 (8). – С. 48 - 53.
4. Палагин, А. Н. Технологическая схема системы балластировки судов погружного типа SEMI–SUBMERSIBLE HEAVY–LIFT // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 4(59). – С. 230-241.
5. Палагин, А. Н. Метод устранения воздушных пробок внутри балластных танков // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – № 27 (5). – С. 109–113.
6. Малахов, А. В., Палагин, А. Н. Система стабилизации судов типа HEAVY–LIFT // Матеріали 7 Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2016", – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016 – С. 29-30.
7. Малахов А. В. Изучение процесса разрушения движущихся воздушных каверн внутри заполненных балластных танков судов погружного типа SEMI–SUBMERSIBLE HEAVY–LIFT / Малахов А. В., Палагин А. Н., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. // Матеріали науково–технічної конференції “Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт”, Частина 1. – Одеса: НУ"ОМА", 2017, – 279 с.
8. Малахов, А. В., Палагин, А. Н., Маслов, И. З. Моделирование процесса разрушения воздушных пузырей при заполнении замкнутых объемов // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 2(61). – С. 76 - 83.
9. Малахов А. В., Палагин А. Н. Метод устранения воздушных пробок внутри балластных танков судов погружного типа / Малахов А.В., // Матеріали міжнародної науково–технічної конференції "Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство ТМІЕТ – 2017", – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017 – С. 85-86.
10. Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю., Дулгеров, Д. Д. Волоконно- оптична розподілена система безпеки морських портів // Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche: Raccolta di articoli scientifici «ΛΌГОΣ» con gli atti della VII Conferenza scientifica e pratica internazionale, Bologna, 6 giugno, 2025. Bologna-Vinnytsia: Associazione Italiana di Storia Urbana & UKRLOGOS Group LLC, 2025. – P. 332 - 340. DOI: 10.36074/logos-06.06.2025.066.

11. Будашко, В. В., Сандлер, А. К., Шевченко, В. А. Імовірнісний підхід вирішення задач діагностування технічного стану високотехнологічних суднових установок // XI міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 23.11.2021 - 24.11.2021 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2021. – С. 211 - 226. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.

12. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Волоконно-оптический инвариантный гидрофон // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – 2016. – Вип. 271. – Т. 283. Комп'ютерні технології. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – С. 16 - 20.

13. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

14. Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю. Застосування новітніх типів оптичного волокна у навігаційних підводних безпілотних апаратах // Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: с avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2025. – P. 214 - 221. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.

15. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – №. 5(125). – P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.

16. Наноплазмоника и биосенсорика. URL: https://fot-lab.ru/ Nanoplasmonics_and_ biosensory. php.

17. Патент № CN104458658A. МПК G01N21/552 (2014.01). Surface Plasmon Resonance Biosensor Based on Tilted Fiber Bragg Grating technical field / заявитель и владелец патента Китайский университет Цзилианг. – 201410623411.6. – заявл. 24.11.2014; опубл. 25.03.2015.

18. Патент № 2735631C1. МПК G01N21/41 (2006.01). Волоконно-оптический плазмонный датчик показателя преломления жидкости / О. В. Бутов, К. А. Томышев, Д. К. Тажетдинова; заявитель и владелец патента Фонд перспективных исследований. – 2019129109. – заявл. 16.09.2019; опубл. 05.11.2020, Бюл. № 31. – 3 с.

19. Зыкина, А. А., Плясцов, С. А., Гладских, И. А. Повышение чувствительности рефрактивного волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса и MMFSMF-MMF структуры с помощью диэлектрических покрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2025. – Т. 25. – № 2. – С. 222 - 228. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-222-228.

20. Syuan Jhuang, Gautham Kumar, Fang-Chung Chen. Localized surface plasmon resonance of copper nanoparticles improves the performance of quasi-two-dimensional perovskite light-emitting diodes. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109204.

21. Сандлер, А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // Автоматизація суднових технічних засобів. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ ОМА. – С. 79 - 89. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89.

22. Сандлер, А. К., Данчук, Д. П. Засіб підвищення ефективності моніторингу стану вантажу на суднах-газовозах на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – Одеса: ОНАХТ. – С. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp. v13i4.2202.

23. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливоподготовки // Судовые энергетические установки. – 2009. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 17 - 22.

24. Сандлер А. К., Палагін, О. М. Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 102 – 112. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-104-113.

25. Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ"ОМА". – 2020. – С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.

ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У МОРСЬКІЙ ГАЛУЗІ

Михайленко В.С., д.т.н., професор,
https://orcid.org/0000-0002-1401-0053
Гунченко Ю.О., д.т.н., професор,
https://orcid.org/0000-0003-4423-8267
Лещенко В.В., старший викладач,
https://orcid.org/0000-0003-0219-5174
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *Проведено аналіз сучасних тенденцій, архітектури, прикладів використання, переваги та проблеми впровадження Інтернету речей (IoT) у морському секторі. Необхідність підвищення ефективності експлуатації суден та посилення екологічних норм потребує використання IoT-технологій, що забезпечує нові підходи до моніторингу, управління та оптимізації процесів.*

Ключові слова: *Сучасні тенденції. Ефективність експлуатації суден. IoT-технології.*

INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES IN THE MARITIME INDUSTRY

Mykhailenko V., Dr. of Science, Professor
https://orcid.org/0000-0002-1401-0053
Gunchenko Yu., Dr. of Sciences, Professor
https://orcid.org/0000-0003-4423-8267
Leshchenko V., Senior Teacher
https://orcid.org/0000-0003-0219-5174
National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract: *An analysis of current trends, architecture, use cases, advantages and challenges of implementing the Internet of Things (IoT) in the maritime sector has been conducted. The need to increase the efficiency of vessel operation and strengthen environmental standards requires the use of IoT technologies, which provides new approaches to monitoring, management and optimization of processes.*

Keywords: *Current trends. Efficiency of vessel operation. IoT technologies.*

Введення

Інтернет речей (IoT) стає ключовим напрямком цифрової трансформації морської галузі. В умовах глобальної конкуренції, необхідності підвищення ефективності експлуатації суден та посилення екологічних норм IoT-технології забезпечують нові підходи до моніторингу, управління та оптимізації процесів. Застосування IoT скорочує експлуатаційні витрати, підвищує безпеку та сприяє переходу до автономного судноплавства. Цей документ розглядає сучасні тенденції, архітектуру, приклади використання, переваги та проблеми впровадження IoT у морському секторі.

IoT-системи на морських суднах включають безліч компонентів, що взаємодіють у режимі реального часу.

Основні елементи сенсорної мережі: датчики температури, тиску, вібрації, витрати палива, рівня рідин, забруднення.

Бортові обчислювальні модулі: пристрої edge-аналітики, здатні попередньо обробляти дані.

Супутникові канали зв'язку: Iridium, Inmarsat, VSAT, що забезпечують передачу даних між судном та берегом.

Хмарні платформи: системи зберігання, аналізу та візуалізації даних.

Інтеграційні шлюзи: забезпечують взаємодію IoT-датчиків із судновими інформаційними системами. Архітектура IoT створює єдину цифрову екосистему, що забезпечує

доступ до даних із будь-якої точки світу [1-3]

Одним із найбільш затребуваних напрямків IoT є віддалений моніторинг роботи суднових механізмів. (рис.1)

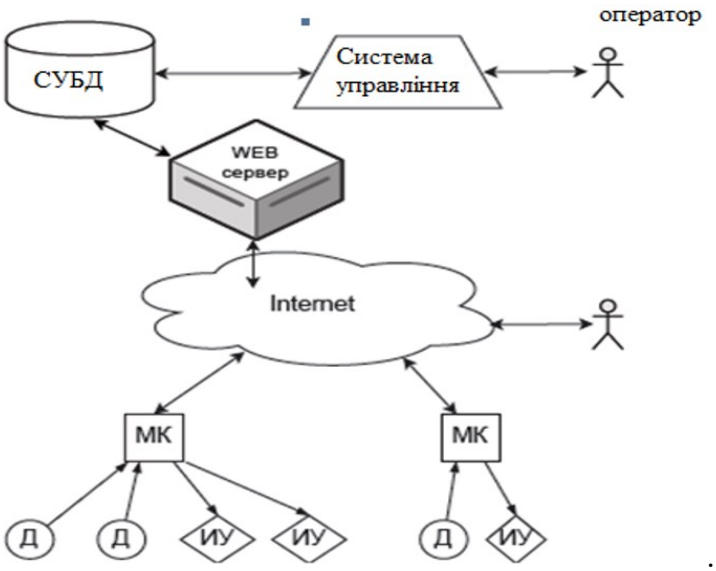


Рисунок 1 - Система IoT в архітектурі «клієнт-сервер» в судових систем

Датчики збирають дані про вібрацію, температуру підшипників, тиск масла, навантаження на двигуни. Отримана інформація використовується:

- для: діагностики стану обладнання в режимі реального часу;
- передиктивного обслуговування (predictive maintenance);
- раннього виявлення несправностей;
- оптимізації графіків ремонту.

Впровадження IoT дозволяє скоротити аварійність, знизити вартість технічного обслуговування та уникнути тривалих простоїв.

Нещодавно Південнокорейські дослідники успішно провели перші у світі випробування мережі зв'язку для морського Інтернету речей (MIB) в реальних умовах. За допомогою датчиків та комунікаційного обладнання, встановленого на суднах, портах та маяках, ця система збирає дані про морську обстановку і може використовуватися для управління безпекою та моніторингу навколишнього середовища. Інститут електроніки та телекомунікаційних досліджень у Тедок (ETRI) розгорнув MIB в акваторіях Жовтого та Східно-Китайського морів, досягнувши дальності зв'язку до 35 км та одночасного підключення до 30 пристроїв. Система стала першою реально працюючою мережею IoT, що відповідає стандарту 3GPP [4] Вся інформація про реальну обстановку в режимі он-лайн автоматично відправляється до Хмарного сховища (рис.2).

IoT перетворює не лише морські судна, а й берегову інфраструктуру. Інтелектуальні порти використовують IoT для:

- моніторингу завантаження терміналів;
- керування контейнерами;
- оптимізація маршрутів внутрішнього транспорту;
- автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій. Інтеграція суднових IoT-систем із портовими платформами прискорює обробку суден, зменшує час простою та підвищує ефективність логістичних операцій.

IoT є фундаментом створення автономного судноплавства. Датчики та інтелектуальні системи забезпечують:

- автоматичний контроль технічного стану;
- самостійне прокладання маршрутів;

• прийняття рішень під час маневрування;

• дистанційне керування з берегового центру. Компаніями по всьому світу ведуться випробування автономних кораблів, які можуть здійснювати рейси з мінімальною участю екіпажу [5].

Рисунок 2 – Хмарна архітектура збору даних

Висновки. Технології Інтернету речей грають найважливішу роль цифрової трансформації морської галузі. Вони забезпечують безперервний моніторинг, підвищують безпеку, покращують екологічні показники та сприяють розвитку автономних суден майбутнього. Незважаючи на виклики, пов'язані з інтеграцією та кібербезпекою, IoT залишається однією з найперспективніших технологічних платформ, здатних кардинально змінити морську індустрію. З урахуванням стрімкого розвитку як IoT, так і нейромереж, ми можемо очікувати ще більш інтелектуальних інновацій у майбутньому розвитку суднових систем. Розвиток алгоритмів машинного навчання, збільшення обчислювальної потужності та розширення сфер застосування обох технологій створять основу для розумних рішень, здатних трансформувати наш повсякденний досвід та підвищити рівень безпеки та ефективності в суднових системах управління та в суднобудівній галузі в цілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. Google Cloud ToI [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://cloud.google.com/
2. Azure IoT [Електронний ресурс] - https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot/iot-introduction
3. Blynk [Електронний ресурс] - https://blynk.cloud/dashboard/login
4. Випробування технологій IoT [Електронний ресурс] https://naukatv.ru/news/v_koree_ispytali_pervyj_v_mire_morskoj_internet_veschej
5. Issues surrounding autonomous shipping [Електронний ресурс] https://safety4sea.com/issues-surrounding-autonomous-shipping/

ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сандлер А.К., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-0709-054
Глазєва О.В., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4992-7697
Тимчинський Н.І., здобувач вищої освіти бакалаврського рівня
Національний університет "Одеська морська академія"

Анотація. *Забезпечення безпечної експлуатації вітроенергетичних установок є основним завданням при проектуванні й створенні об`єктів "зеленої" енергетики, від якого надалі залежить увесь виробничий цикл виробництва, пов'язаний з їхнім застосуванням. Сучасні конструкції досить досконалі й мають достатній запас механічної міцності в процесі експлуатації. Однак аналіз аварійності показує, що руйнування елементів вітроенергетичних установок, як і раніше, є основною проблемою протягом багатьох років. Тому встає питання про впровадження інноваційних інженерно-технічних рішень, що дозволяють забезпечити додаткову вірогідність контролю геометрії лопатей вітрогенераторів.*

Ключові слова: *вітрогенератор, лопать, оптичне волокно, грати Брегга.*

INCREASING THE RELIABILITY OF WIND ELECTRICAL POWER PLANT BLADE CONTROL BASED ON FIBER OPTIC TECHNOLOGIES

Sandler Albert, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-0709-054
Glazeva Oksana, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-4992-7697
Tymchinsky Nikita, bachelor's degree student
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract. *Ensuring the safe operation of wind power plants is the main task in the design and creation of "green" energy facilities, on which the entire production cycle of production associated with their use depends in the future. Modern designs are quite advanced and have a sufficient margin of mechanical strength during operation. However, the analysis of the accident rate shows that the destruction of wind power plant elements, as before, has been the main problem for many years. Therefore, the question arises of implementing innovative engineering solutions that allow providing additional reliability of controlling the geometry of wind turbine blades.*

Keywords: *wind turbine, blade, optical fiber, Bragg grating.*

Ефективність вітроенергетичної установки (ВЕЕУ) безпосередньо залежить від аеродинамічних характеристик її турбіни, а ключову роль формуванні цих характеристик грає профіль поперечного перерізу лопатей вітроколеса. Правильний вибір та точна підтримка цього профілю – запорука успішної роботи всієї системи. Проектування лопатей – це складне інженерне завдання, що вимагає врахування безлічі взаємопов'язаних факторів, починаючи від потужних характеристик електрообладнання і закінчуючи найдрібнішими нюансами аеродинаміки.

Потужність, вироблена ВЕЕУ, тісно пов'язана з ефективністю роботи електрогенератора та механічних компонентів. Коефіцієнти потужності та корисної дії різних механізмів відіграють тут найважливішу роль. Необхідно мінімізувати втрати енергії, які виникають через обертання вітроколеса і так званих "кінцевих втрат", пов'язаних з вихором на кінцях лопатей. Ці втрати суттєво знижують ККД установки, тому їх облік та мінімізація є пріоритетними завданнями під час проектування. Найважливішим параметром, що визначає ефективність ВЕЕУ, є швидкість вітру. Навіть за короткий проміжок

часу швидкість вітру може коливатися у значних межах, наприклад, від 50 до 150% від середнього значення. Це означає, що лопаті повинні бути спроектовані таким чином, щоб ефективно працювати в широкому діапазоні швидкостей 4,5 ... 20 м/с та вище, залежно від конкретної моделі. У цьому діапазоні необхідно забезпечити як максимальне виробництво електроенергії, так і мінімальний аеродинамічний опір, щоб уникнути перевантажень елементів конструкції і передчасного зносу.

Перевантаження можуть призвести не тільки до зниження ефективності, але і до серйозних поломок, виходу з ладу окремих вузлів і навіть аварійних ситуацій. Контроль геометричних параметрів лопатей є критичним фактором для досягнення бажаних аеродинамічних властивостей. Лопаті повинні бути складною просторовою поверхнею. Аеродинамічні профілі встановлюються вздовж плавної вигнутої утворює, формуючи таким чином вигин лопаті. Це дозволяє оптимізувати взаємодію лопаті з повітряним потоком, покращуючи захоплення енергії вітру та знижуючи втрати. Незважаючи на десятиліття досліджень в галузі вітроенергетики, завдання дослідження та контролю характеристик аеродинамічних профілів та моделювання роботи лопатей у змінних атмосферних умовах залишається актуальним.

Таким чином, постійне вдосконалення контролю геометрії аеродинамічних характеристик лопатей – це безперервний процес, який забезпечує подальший розвиток вітроенергетики та розширення її застосування у різних кліматичних зонах [1 - 3].

Для подальшого вдосконалення процесу вимірювання кутових переміщень лопатей вітродвигунів в процесі їх обертання, в тому числі лопатей зі змінною геометрією, які складаються з декількох окремих секцій, проаналізовані схемотехнічні рішення відомих приладів контролю геометрії лопатей.

Відомий пристрій для ідентифікації швидкорухомих об'єктів, а саме лопатей несучого гвинта вертольота, містить корпус, встановлений в корпусі лазерний випромінювач видимого проміня, втулки, що оточує світлофільтр по периметру і жорстко пов'язаної з корпусом і світлофільтром. Світлофільтр встановлений перед фотоприймачем і оптично з ним пов'язаний. Втулка оточує світлофільтр з можливістю перекриття випромінювання бічного фону. Пристрій містить також підсилювач, вхід якого пов'язаний з виходом фотоприймача і блок обробки інформації, пов'язаний з підсилювачем. У базовому варіанті всі вузли пристрою розміщені в корпусі. В інших варіантах підсилювач і блок обробки інформації можуть бути встановлені автономно [4].

Генератор задає необхідну частоту світлових імпульсів лазерного випромінювача.

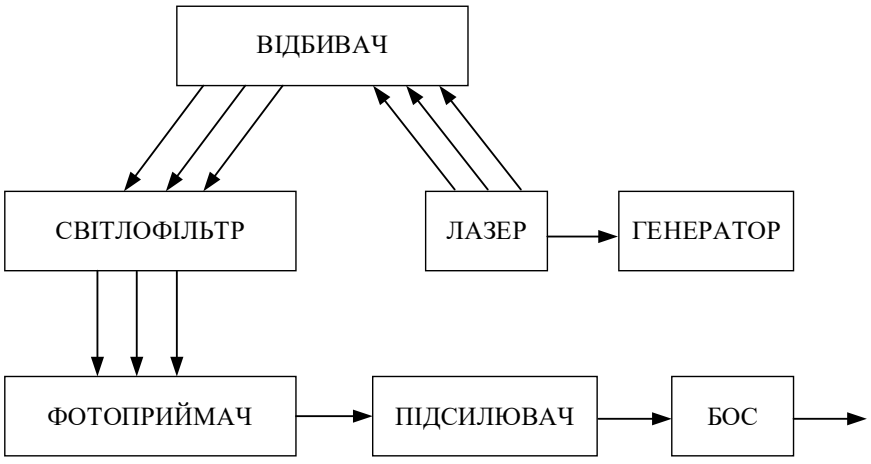


Рисунок 1 – Пристрій для ідентифікації швидкорухомих лопатей

Відбите світло вловлюється фотоприймачем 4 через світлофільтр 5. Фотоприймач 4 перетворює оптичний сигнал електричний. Імпульси струму потрапляють на пов'язаний з фотоприймачем підсилювач, де вони посилюються і надходять в блок обробки інфор-

мації, який ідентифікує лопаті і видає керуючий сигнал на поєднаний з ним відповідний пристрій, для визначення координат лопатей і пристрій для діагностики.

Таким чином, використання в якості джерела світла лазерного випромінювача з видимим променем забезпечує достатню потужність світлових імпульсів, що дозволяє ефективно працювати на великій відстані і використовуватися на вертольотах будь-яких габаритів. Видимий промінь дозволяє легко здійснити налаштування пристрою, повертаючи сам корпус і лазерний випромінювач в корпусі, візуально відстежуючи при цьому положення променя. Нанесення міток зі світловідбиваючої фарби безпосередньо на лопаті дозволяє, що особливо важливо, виключити порушення аеродинамічних характеристик лопатей і встановлення на них додаткових мас, що забезпечує безпеку польоту, дозволяє діагностувати в натурних умовах.

Специфіка прилада, орієнтована саме на контроль лопатей вертольотів, певним чином обмежує можливості прилада при застосуванні у вітроенергетиці. Це обумовлено такими факторами як:

– складність конструкції, що містить світлоприймач з декількох послідовно з'єднаних пристроїв, сумарна похибка яких впливає на точність вимірювань;

– малий діапазон вимірювання кутових переміщень лопатей, який обмежений розмірами об'єктива фотоприймача оптичних сигналів;

– використання як світловідбивачів фарби, плівок та паперу різко знижує інтенсивність відбитого променю за рахунок його поглинення та розсіяння, що потребує додаткових засобів для заглушення бокового та заднього фонів, які по інтенсивності освітлення близькі до відбитого променя;

– необхідність використання декількох лазерних випромінювачів у разі потреби визначення положень низки елементів лопаті.

Найбільш досконалим є прилад контролю вигину лопаті є прилад, який містить блок реєстрації та обробки інформації, лазерний випромінювач з видимим променем, світловідбивачі, які прикріплені до поверхонь лопатей, світлоприймач для реєстрації відхилення променя та фотоприймач. Як світлоприймач використано екран з мірною шкалою по двом осям координат [5].

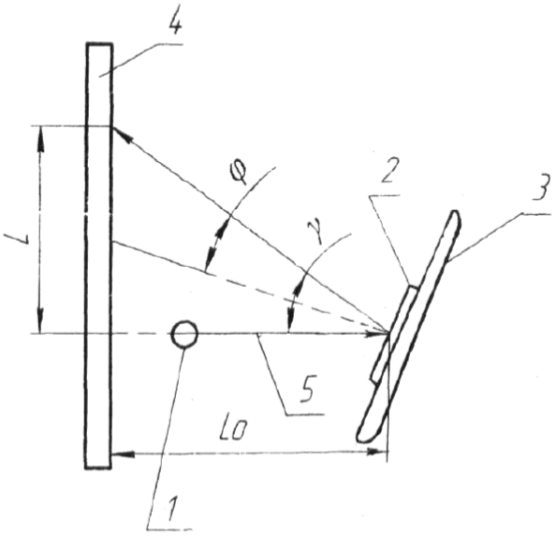


Рисунок 2 – Прилад для визначення кутових переміщень лопатей

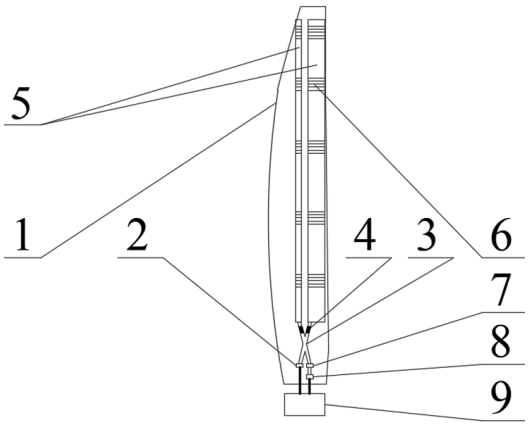


Рисунок 3 – Волоконно-оптичний прилад для визначення кутових переміщень лопатей: 1 – лопать; 2 – лазерний випромінювач; 3 – двобічний оптичний розгалужувач; 4 – оптичний фільтр; 5 – планарні світловоди; 6 – волоконні грати Брегга; 7 – компенсуючий інтерферометр; 8 – фотоприймач; 9 – блок реєстрації та обробки інформації.

Технічний ефект, який досягається, полягає в тому, що при обертанні колеса лопать зі світловідбивачем, при проходженні точки зустрічі з лазерним променем, відображає

його на екран, на якому виникає мигаюча, а для людського ока – постійна, яскрава крапка. Знаючи відстань екрана від світловідбивача, за відхиленням променя на екрані можливо визначити кут відбиття променя і кут положення лопаті відносно площини обертання колеса з великим ступенем точності, який залежить тільки від відстані екрана.

Незважаючі на суттєву досконаліть приладу, саме наявність відкритого оптичного каналу є причиною, яка стримує його широке застосування. Основними недоліками приладу, обумовленними наявністю відкритого оптичного каналу є:

– необхідність періодичного корегування геометрії та очищення поверхонь відкритого оптичного каналу який складається з двох окремих елементів як-то світловідбивач та екран;

– необхідність прецизійної точності при монтажу приладу на лопаті;

– вплив гідрометеорологічних та експлуатаційних чинників на вирогідність вимірювань.

Таким чином, уявляється доцільним створення приладу для визначення кутових переміщень лопатей, в якому усунуті недоліки відкритого оптичного каналу вимірювання, залежність від гідрометеорологічних та експлуатаційних чинників, підвищена вирогідність вимірювань, та одночасно збережені надійність та простота схемотехнічних рішень приладів відомих типів.

Існуючі засоби і пристрої контролю об`єктів вітроенергетики функціонують в умовах дестабілізуючих факторів – концентрованого впливу потужних електромагнітних і термічних полів, під дією вібрацій. Саме ці збурення не дозволяють забезпечити ефективний, відповідний сучасним експлуатаційним вимогам, моніторинг технічного стану лопатей ВЕЕУ.

Аналіз відомих рішень доводить, що для сучасної технічної експлуатації і ремонту ВЕУ затребувані нові засоби діагностування та прогнозування технічного стану їх підшипникових вузлів, а саме – нечутливі до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів пристрої волоконної оптики [6 - 8].

Поставлена задача вирішується тим, що прилад для визначення кутових переміщень лопатей, що містить блок реєстрації та обробки інформації, лазерний випромінювач, фотоприймач. Основна відмінність розробленого приладу полягає у тому, що лазерний випромінювач та компенсуючий інтерферометр, зв`язаний з фотоприймачем, сполучені з первинними гілками двобічного оптичного розгалужувача, вторинні гілки якого містять оптичні фільтри та сполучені з планарними світловодами. Планарні світловоди волоконні грати Брегга та закріплені уздовж внутрішнього простору лопаті паралельно та перпендикулярно площині обертання лопаті.

Суть схемотехнічного рішення пояснюється на рис. 3.

Вторинні гілки двобічного оптичного розгалужувача, які містять оптичні фільтри 4, сполучені з двома планарним світловодами 5. Планарні світловоди містять волоконні грати Брегга 6 та жорстко зафіксовані у внутрішньому просторі лопаті 1 у площинах паралельних та перепендикулярних до площини обертання лопаті. Друга первинна гілка двобічного оптичного розгалужувача сполучена з компенсуючим інтерферометром 7, який сприймає випромінювання у зворотному напрямку, яке відбивається від торців планарних світловодів. Випромінювання, після перетворення у компенсуючому інтерферометрі надходить до фотоприймача 8 та блоку реєстрації та обробки інформації 9.

Прилад працює у такий спосіб. Випромінювання лазерного випромінювача 2 спрямовується на первинну гілку первинного двобічного оптичного розгалужувача 3.

У розгалужувачі випромінювання розділяється на два потоки, та у оптичних фільтрах у вторинних гілках здійснюється перетворення довжини хвилі випромінювання для кожного планарного світловода індівідуально. Перетворене випромінювання вводиться до планарних світловодів з волоконними гратами Брегга.

Відрізок планарного світловода між двома волоконними грат Брегга є інтерферо-

метром Фабрі-Перо. Планарні світловоди жорстко зв'язані з лопатею, так що деформація лопаті призводить до розтягування або стискання планарних світловодів. Під впливом деформації при вигині лопаті змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх волоконних грат Брегга. Кожна з волоконних грат Брегга відображає імпульс, що надходить на неї від лазерного випромінювача, на одній і тій же довжині хвилі Брегга. При цьому тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика – планарному світловоді між гратами [9 -11].

Відбите від торців планарних світловодів випромінювання надходять у компенсуючий інтерферометр. Зміна в часі деформації планарних світловодів в результаті зовнішнього впливу викликає зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останні перетворюється фотоприймачем в зміну величини струму. Додатковий зсув фаз між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотоприймача на ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей интерферирующих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

Технічний результат досягається завдяки тому, що застосування планарних світловодів з волоконними гратами Брегга, закріпленими уздовж внутрішнього простору лопаті паралельно та перпендикулярно площині обертання лопаті забезпечить:

– одночасне вимірювання вигину лопаті у двох площинах;

– стабільність параметрів моноблочного чутливого елементу датчика у вигляді планарних світловодів;

– інваріантність до впливу гідрометеорологічних та експлуатаційних чинників на вимірювальний канал;

– підвищена вирогідність вимірювань;

– зменшення витрат на технічне обслуговування приладу у експлуатації.

Прилад є простим у виготовленні та застосуванні, бо для його створення застосовуються освоєні промисловістю волоконно-оптичні компоненти.

Використання приладу для визначення кутових переміщень лопатей при їх обертанні дозволяє оперативно і з високим ступенем точності визначити параметри його аеродинамічних характеристик і здійснити пошук перспективних шляхів підвищення енергетичних характеристик ВЕЕУ у поєднані з перспективними вимірювальними приладами на основі волоконно-оптичних технологій [12, 13].

Імплементація волоконно-оптичних технологій матиме вагоме значення для підвищення ефективності взаємодії між стейкхолдерами та закладами вищої освіти та сприятиме досягненню соціальних вигод на ринку підготовки відповідних фахівців. Ця ініціатива сприяє взаємодії між навчальними закладами та підприємствами, забезпечуючи сталість та фінансову стабільність, що є ключовими для успішного розвитку галузі буксирування об`єктів морем [14, 15].

ЛІТЕРАТУРА

1. Богатир, М. С. Деформація лопаті промислового вітрогенератора під дією вітрових навантажень при відмові системи керування вітрогенератора // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD – 2020. – Харків: Планета-Прінт, 2020. – С. 65.

2. Прудников, А. П., Цыганова, К. А. Исследование влияния формы лопастей ротора на эффективность ветрогенератора. URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/issledovanie-vliyaniya-formy-lopastey-rotora-na-effektivnost-vetrogeneratora/viewer.

3. Евсеев, Д. Ю., Овчинникова, О. К. Численное моделирование обтекания аэродинамического профиля и лопасти ветрового колеса. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-obtekaniya-aerodinamicheskogo-profilya-i-lopasti-vetrovogo-kolesa/viewer

4. Патент № 38950. МПК G01P 3/36. Устройство для идентификации быстродвижущихся объектов, преимущественно лопастей несущего винта вертолета / заявитель и патенто-

обладатель Кузнецов А. М. – 2004102413. – заявл. 28.01.2004; опубл. 10.07.2004. – 3 с.

5. Патент № 123028. МПК G01P 3/44 (2006.01) G01B 7/30 (2006.01) B64C 11/16 (2006.01). Прилад для визначення кутових переміщень лопатей / Г. О. Оборський, Б. О. Моргун, Ю. Б. Моргун, І. В. Прокопович; заявник та володар патенту Одеський національний політехнічний університет. – u201707245. – заявл. 10.07.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3. – 3 с.

6. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

7. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Видатінформ НУ"ОМА", 2018. – 165 с.

8. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Енергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

9. Заічко, С. І., Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Схемотехнічне рішення азимутального датчику вітру // Судовождение. – 2015. – Вып. 26. – Одесса: НУ"ОМА". – С. 93 - 98.

10. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – №. 5(125). – P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2023. 289773.

11. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Поворотный волоконный соединитель для судовых измерительно-информационных систем // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: НУ"ОМА". – С. 79 - 86.

12. Карпилов, А. Ю., Сандлер, А. К. Волоконная оптика в системах управления ветровыми движителями // Науково-практична конференція "Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки", 12 - 18 грудня 2012 р.: матеріали конференції. – Одеса: ОНМА. – 2012. – С. 30 - 32.

13. Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б., Сандлер, А. К. Автоматизований вітрильно-рушійний комплекс – новітні вітрила на "старих" щоглах // Грааль науки: міжнар. наук. журнал. – Вінниця: ГО "Європейська наукова платформа"; НУ "Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці", 2024. – № 39. – С. 369 - 374. DOI: 10.36074/grail-of-science.10.05.2024.056.

14. Кузьменко, К. М., Сандлер, А. К. Особливості формування трудових резервів в умовах автоматизації суден // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers "ΛΌГОΣ" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. – 2024. – P. 79 - 82. DOI: 10.36074/logos-29.03.2024.01.

15. Бабаченко, М. В., Сандлер, А. К. Підвищення ефективності взаємодії стейкхолдерів та морських закладів вищої освіти // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers "ΛΌГОΣ" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. – 2024. – P. 82 - 84. DOI: 10.36074/logos-29.03.2024.019.

ЗАСІБ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У СУДНОВОМУ СКРУБЕРІ

Сандлер А.К., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-0709-0542
Удолатій В.Б., асистент
https://orcid.org/0009-0004-0069-5161
Національний університет "Одеська морська академія",Україна

Анотація. *Скрубери пропонують потенціал для зниження експлуатаційних витрат, дозволяючи використовувати менш дороге паливо з високим вмістом сірки. Капітальні витрати, вартість встановлення та експлуатаційні витрати, пов'язані зі скруберами, повинні розглядатися для кожного судна окремо. Ці витрати слід оцінювати з урахуванням альтернатив експлуатації судна на паливі з низьким вмістом сірки або на альтернативному паливі з низьким вмістом сірки, такому як скраплений природний газ. Перехід на інше паливо, це експлуатаційна практика, при якій паливо з вищим вмістом сірки використовується там, де це дозволено, а паливо з нижчим вмістом сірки використовується там, де це необхідно, має свої складнощі та ризики, але його також слід враховувати під час оцінки варіантів відповідності палива. Однак, існує актуальне науково-технічне завдання підвищення надійності вимірювальних пристроїв для моніторингу процесу очищення відпрацьованих газів. Для вирішення цієї задачі розроблений газоаналізатор на основі комбінованого чутливого світловоду.*

Ключові слова: *скрубер, відпрацьований газ, волоконно-оптичний газоаналізатор*

A MEANS OF MONITORING THE EXHAUST GAS PURIFICATION PROCESS IN A SHIP SCRUBBER

Sandler Albert, Ph.D., associate professor
https://orcid.org/0000-0002-0709-054
Udolatiy V.B., Assistant
https://orcid.org/0009-0004-0069-5161
National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Abstract. *Scrubbers offer the potential to reduce operating costs by allowing the use of less expensive high-sulfur fuels; the capital costs, installation costs and operating costs associated with scrubbers should be considered on a ship-by-ship basis. These costs should be assessed against the alternatives of operating the ship on low-sulfur fuels or alternative low-sulfur fuels such as liquefied natural gas. Fuel switching, an operational practice in which higher-sulfur fuels are used where permitted and lower-sulfur fuels are used where required, has its own challenges and risks, but should also be considered when assessing fuel suitability options. However, there is a pressing scientific and technical challenge to improve the reliability of measurement devices for monitoring the exhaust gas cleaning process. To solve this problem, a gas analyzer based on a combined sensitive optical fiber has been developed.*

Keywords: *scrubber, exhaust gas, fiber optic gas analyzer*

Морська галузь стикається з проблемою впровадження нових технологій та операційних практик для дотримання суворіших міжнародних, регіональних, національних та місцевих правил щодо зменшення викидів відпрацьованих газів (ВГ) із суден. Негативний вплив ВГ двигунів внутрішнього згоряння та ВГ парових котлів на людей та чутливі екосистеми добре досліджений. Метою правил для викидів ВГ, запроваджених різними організаціями, є зменшення впливу судноплавства на глобальну та місцеву якість повітря. Ключовим серед цих правил є заходи щодо зменшення викидів оксиду сірки (SO_x), властивих відносно високому вмісту сірки в традиційному судновому паливі. Проектувальники, власники та оператори суден мають низку різних шляхів для досягнення відповідності нормативним вимогам щодо SO_x, включаючи:

– використання суднового палива з низьким вмістом сірки на існуючому обладнанні;

–встановлення новітнього обладнання (або реновація існуючого обладнання, де це можливо), призначеного для роботи на альтернативному паливі з низьким вмістом сірки, такому як зріджений природний газ (ЗПГ);

–встановлення системи очищення відпрацьованих газів (СОВГ) як пристрою для подальшої обробки.

Рекомендації, які були вперше опубліковані у 2013 році, підсумовують нормативні вимоги, що застосовуються до СОВГ SO_x, так званим скруберам, та надають огляд доступних технологій, а також висвітлюють деякі питання вибору, встановлення та експлуатації, які необхідно враховувати при виборі СОВГ, як засобу відповідності чинним та майбутнім нормам викидів вихлопних газів. Нормативи щодо забруднення морського повітря зазвичай вимагають використання палива з низьким вмістом сірки для зменшення викидів газоподібних SO_x та сульфатної частини викидів - твердих частинок (PM). Однак використання технології EGCS зазвичай дозволено як ефективний альтернативний засіб для дотримання норм, що вимагають використання палива з вмістом сірки 0,1% та 0,5%. Окрім дотримання вимог щодо викидів SO_x, судна, побудовані після 1 січня 2016 року, якщо вони експлуатуються в межах зон контролю викидів Північної Америки та Карибського басейну США, або судна, побудовані після 1 січня 2021 року та експлуатуються в межах зон контролю викидів Північного та Балтійського морів, повинні відповідати вимогам NO_x Tier III [1 - 5].

Хоча скрубери пропонують потенціал для зниження експлуатаційних витрат, дозволяючи використовувати менш дороге паливо з високим вмістом сірки, капітальні витрати, вартість встановлення та експлуатаційні витрати, пов'язані зі скруберами, повинні розглядатися для кожного судна окремо. Ці витрати слід оцінювати з урахуванням альтернатив експлуатації судна на паливі з низьким вмістом сірки або альтернативному паливі з низьким вмістом сірки, такому як ЗПГ. Перехід на інше паливо, експлуатаційна практика, при якій паливо з вищим вмістом сірки використовується там, де це дозволено, а паливо з нижчим вмістом сірки використовується там, де це необхідно, має свої складнощі та ризики, але його також слід враховувати під час оцінки варіантів відповідності палива.

Експлуатаційний профіль судна часто диктуватиме, який варіант відповідності пропонує найкращі капітальні витрати порівняно з експлуатаційною вигодою. Слід визначити загальну вартість конкретного судна, щоб прийняти найкраще рішення.

Технологія абсорбційного очищення відпрацьованих газів суднового двигуна заснована на нейтралізації оксидів сірки (SO_x) у процесі їх взаємодії з хімічними елементами, що втримуються в розпиленій морській воді усередині скрубера. Система ефективно функціонує й при використанні прісної води, куди додають вапняк або карбонат кальцію [6, 7].

Вибір конкретної технології залежить від конструкції скрубера й передбаченого режиму роботи, який може бути реалізований у відкритому або закритому циклі. Але скрубер будь-якої конструкції ефективно працює лише за умови наявності інформаційно-вимірювальної системи, яка надає вірогідну інформацію, та первинні перетворювачі якої є значним чином інваріантними до дестабілізуючих факторів.

Таким чином, можна вважити сформованим запит практики на створення системи моніторингу установки десульфурації ВГ, у якій застосовуються більш інформативні параметри газового середовища для керування процесом очищення та водночас збережені ефективні технічні рішення установок відомих типів [8 - 10].

Одночасно із цим проведений аналіз існуючих газоаналітичних пристроїв дозволив виявити наступне – більшість застосовуваних газоаналізаторів не здатні забезпечити ефективний моніторинг рівня токсичних викидів у складі ВГ.

З метою визначення причин виникнення деструктивної ситуації при контролі газового середовища об'єктів суднової енергетичної установки були досліджені конструкції найпоширеніших типів газоаналізаторів.

Розповсюджена конструкція газоаналізатора включає ртутну лампу, вузькосмуговий фільтр, комбінований світловодний джгут для передачі випромінювання до досліджуваного середовища, а також групу лінз і напівпрозорий світлорозподілювач. Застосування оптичного волокна забезпечує стійкість до багатьох дестабілізуючих факторів. Проте, функціональність аналізатора обмежується наступними факторами: необхідність регулярного коректування відмінностей у параметрах світловодів на початковому етапі використання пристрою й пов'язана із цим неоднакова швидкість деградації елементів джгута в процесі експлуатації, а також обмеження по можливості аналізу тільки газового середовища із заздалегідь відомим складом або типом [11].

У меншій мірі експлуатаційні фактори впливають на метрологічні характеристики волоконно-оптичного газоаналізатора, основою якого є пластина з кварцового скла, до якої по колу приварено 24 відрізки чутливих волоконних світловодів. У центрі пластини нанесено відбивний шар, до якого приварений основний світловод з волоконним розгалужувачем. На відповідних плечах розгалужувача змонтовано мультиплексор, демультиплексор та світловоди для підведення та відведення випромінювання [12].

Саме коаксіальне розташування відрізків чутливих волоконних світловодів суттєвим чином впливає на можливості зазначеного пристрою, тому що вимагає прецизійних технологій позиціювання відрізків у процесі монтажу датчика та підтримки геометрії зв`язку основного та чутливих світловодів.

В умовах сучасних реалій необхідним стало розробити нове схемотехнічне рішення для датчика газового складу. Пропонований датчик орієнтований на ефективний контроль більш широкого спектра газових середовищ. Його конструкція, заснована на використанні компонентів з однорідних матеріалів, повинна забезпечити підвищену стабільність та захищеність внутрішніх елементів пристрою без суттєвого ускладнення. При цьому передбачено, що конструктивні особливості датчика дозволять:

– зберегти високий рівень чутливості й швидкодії пристроїв коаксіального типу;

– забезпечити можливість оперативної експлуатації в режимі безперервного або квазібезперервного контролю газового середовища або визначення її фізичних параметрів.

Для вирішення поставленої задачі запропоновано схемотехнічне рішення на основі єдиного, але багатокомпонентного чутливого світловода.

Чутливий світловод складається з основних ділянок, між якими плазменним зварюванням вмонтовані ділянки з особливими показниками заломлення. Показник заломлення кожної окремої ділянки забезпечує, при контакті з газовим середовищем SO_x певної концентрації, додаткове випромінювання світла з чутливого світловода на визначеній довжині хвилі.

У статичному режимі, тобто у відсутності газового середовища, відмінного від атмосферного повітря, у чутливому світловоді відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання. Це обумовлено лише впливом згасання у матеріалі світловоду. Випромінювання, що надходить від мультиплексора, має кількість довжин хвиль, що відповідає кількості чутливих світловодів.

При зануренні в контрольоване газове середовище відбувається перекачування оптичного випромінювання з особливих ділянок світловода назовні, тобто реалізується оптичний тунельний ефект. Після цього випромінювання, зі зменшеною інтенсивністю, відбивається від шару, що відбиває, і через відповідну гілку розгалужувача надходить у демультиплексор. Інтенсивність зареєстрованого випромінювання буде пропорційна величині вимірюваного параметра газового середовища. Величина довжини хвилі, на якій буде зареєстрована максимальна величина інтенсивності світла, відповідатиме конкретному типу газового з'єднання. Подальша обробка випромінювання, що надходить з демульти-

плексора, дозволить отримати електричний сигнал, який буде пропорційним величині концентрації газового середовища .

Запропонована конструкція відрізняється тим, що для передачі та прийому світлового випромінювання використовується єдиний світловод, а як чутливі елементи, використовуються ділянки світловода з різними показниками заломлення. Для компенсації впливу факторів, що дестабілізують, застосовані елементи з однаковими коефіцієнтами теплового поширення, які скомпоновано в єдиний блок. Таким чином, в газоаналізаторі пропонованої конструкції комбінація оптичних елементів забезпечить: більш адекватне перетворення параметрів газового середовища; зміну інформаційного сигналу; компенсацію впливу факторів, що дестабілізують, на вимірювальний канал газоаналізатора; збільшення діапазону контрольованих газових сумішей; підвищення якості функціонування за рахунок використання матеріалів з однаковим коефіцієнтом теплового розповсюдження та обрання раціональної схеми модуляції опорного випромінювання [13, 14].

Об`єднання пропонованого пристрою з іншими волоконно-оптичними датчиками дозволить створити загальну волоконно-оптичну інформаційно-вимірювальну систему та перейти до принципів превентивного моніторингу, вчасно виявляючи потенційні несправності і запобігати аварійним ситуаціям, тим самим гарантуючи безпеку судноплавства та ефективність використання скруберів протягом усього їх життєвого циклу [15 - 19].

Це забезпечить не тільки економію матеріальних ресурсів за рахунок зниження числа позапланових ремонтів, але й приведе до істотного підвищення рівня екологічної безпеки й енергоефективності суден [20].

ЛІТЕРАТУРА

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. – Кн. I и II. – С-Пб.: ЗАО "ЦНИИМФ", 2008.
2. Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. URL: https://ww2.eagle.org/ content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/exhaust-gas-scrubber-systems-advisory. pdf.
3. Скрубберы. URL: https://ciss-group.com/ru/ uslugi/ sudoxodstvo/ obsluzhivanie-i-remont-morskix-stanczij/1173-skrubberyi.html.
4. Ivanchenko, A. A., Mitrashov, S. V. Alignment of characteristics of vessel scrubers and diesel plants. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/soglasovanie-harakteristik-skrubberov-i-dizelnyh-ustanovok-sudov.
5. Удолатій, В. Б. Напрями вдосконалення системи очищення відпрацьованих газів на суднах // Science, research, development, technics and technology. – Гданьск, 2020. – № 29. – С. 66 - 69.
6. Удолатій, В. Б. Аналіз сучасних систем зниження шкідливих викидів оксидів сірки суднових енергетичними установками // Річковий та морський флот: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції– Одеса: НУ "ОМА". – 2021. – С. 286-291.
7. Удолатій. В. Б. Огляд методів зниження токсичності газових викидів суднових енергетичних установок від оксидів сірки // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" – Одеса: НУ"ОМА". – 2022. – С. 146 - 150.
8. Удолатій, В. Б. Оцінка ефективності роботи систем очищення димових газів морських суден при використанні скруберів // матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт" – Одеса: НУОМА. – 2023. – С. 229 - 239.
9. Удолатій, В. Б. Оцінка ефективності інвестицій в скруберні системи на морських суднах // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" – Одеса: НУОМА, 2023. – С. 245 - 248.
10. Удолатій, В. Б. Процеси десульфурації: останні розробки та вдосконалення // Матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт", 21.03.2024 - 22.03.2024. – Одеса: НУ "ОМА", 2024.
11. Eric Udd, William B. Spillman, Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, 2011. - 512 P.

12.Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Новое схемотехническое решение волоконного газоанализатора // Автоматизация судовых технических средств. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 93 - 96.

13.Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. – К., 2021. – 159 с.

14.Сандлер, А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // Автоматизація суднових технічних засобів. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ ОМА. – С. 79 - 89.

15.Сандлер, А. К., Данчук, Д. П. Засіб підвищення ефективності моніторингу стану вантажу на суднах-газовозах на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – Одеса: ОНАХТ. – С. 18 - 26.

16.Sandler, A., Romanovska, O., Palagin, O., Tymchynskyi, N. Fiber optic pH meter for ballast water control // Інновації та науковий потенціал світу: збірник наукових праць з матеріалами VII Міжнародної наукової конференції, м. Суми, 10 жовтня, 2025 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ "УКРЛОГОС Груп", 2025. – С. 228 - 236. DOI 10.62731/mcnd-10.10.2025.

17.Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, А. А., Цюпко, К. Ю. Схемотехническое решение инвариантного датчика влажности // Автоматизация судовых технических средств. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 97 - 102.

18.Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ"ОМА". – 2020. – С. 63 - 68.

19.Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б. Волоконно-оптичний пристрій для систем автоматизованого екологічного моніторингу // Automation of Technological and Business Processes. – 2024. – № 16 (3). – P. 95 - 99. https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880.

20.Скрипник, Н. А. Детермінанти забезпечення конкурентоспроможності економіки України в умовах активізації глобальних інтеграційних процесів // Економічний аналіз. – 2012. – № 11(4). – С. 151 - 154.

Секція 9. **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

ОГЛЯД СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВТУЛОК ЦИЛІНДРІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Разінкін Р.О., старший викладач
https://orcid.org/0000-0002-5817-7445
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Анотація: *виконано огляд способів підвищення надійності втулок циліндрів суднових дизелів. Зазначено, що для умов експлуатації суднових дизелів на протязі гарантованого фірмами-виробниками періоду міжремонтного періоду найбільш раціональним методом зменшення зносу циліндрових втулок та підвищення їх надійності є управління реологічними характеристиками моторних мастил, що використовуються в системах мащення.*

Ключові слова: *втулка циліндра, знос, моторне мастило, система мащення, судновий дизель.*

OVERVIEW OF WAYS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF CYLINDER LINERS IN MARINE DIESEL ENGINES

Razinkin R.O., Senior Lecture
https://orcid.org/0000-0002-5817-7445
Denube Institutes of National University Odessa Maritime Academy

Abstract: *a review of methods for increasing the reliability of cylinder liners of marine diesel engines was conducted. It was noted that for the operating conditions of marine diesel engines during the maintenance period guaranteed by manufacturers, the most rational method of reducing cylinder liner wear and increasing their reliability is to control the rheological characteristics of motor oils used in lubrication systems.*

Keywords: *cylinder liner, engine oil, lubrication system, marine diesel, wear.*

Постановка практичної проблеми. Розвиток сучасного суднового дизелебудування характеризується збільшенням циліндрової потужності за рахунок форсування двигуна з одночасним прагненням підвищити надійність, економічність та екологічну безпеку за умовою зростаючій інтенсивності експлуатації. Зростання циліндрової потужності внаслідок форсування двигуна призводить до пропорційного підвищення механічної та температурної напруги в деталях циліндропоршневої групи (ЦПГ), у тому числі і у втулці циліндра. Експлуатація двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на важких сортах палива (до складу яких, на жаль, разом із вуглеводневими компонентами входять металеві домішки та неорганічні сполуки) призводить до зниження довговічності насамперед деталей ЦПГ. Це пов'язано з підвищеними зносами внаслідок зростання швидкостей абразивного і корозійного видів зношування [1].

Мета роботи – визначення найбільш ефективних спосіб підвищення надійності втулок циліндрів суднових дизелів.

Матеріали та методи. На процес зношування поверхонь тертя втулок циліндрів впливає велика кількість факторів, що залежать від типу двигуна (двох- або чотиритактний), конструктивних особливостей, величин деформації як втулок, також і сполучених деталей (блоку циліндрів, поршню, поршневих кілець), ступеня форсування, застосовува-

них палива та моторного мастила, а також дотримання правил технічної експлуатації. У сучасних двигунів максимальний тиск згоряння досягає 15…18 МПа і температура робочої поверхні втулки в зоні верхньої мертвої точки (ВМТ) першого компресійного кільця досягає 350...380 °С. Таким чином, технічний прогрес у галузі дизелебудування, спрямований на збільшення циліндрової потужності сучасних двигунів, неминуче пов'язаний із зростанням питомого тиску тертя та теплової напруженості деталей ЦПГ, що неминуче призводить до погіршення умов тертя та інтенсифікації зношування робочих поверхонь втулок циліндрів.

Зношування робочої поверхні втулки є наслідком процесу тертя поршня і кілець об її стінку. Під час усунення інших причин відмов (тріщини, кавітаційне зношування поверхні та ін.) ресурс втулок циліндрів визначається їх зносостійкістю. Найбільшої величини зношування втулок досягає в районах верхнього поршневого кільця (як у двотактних, також й чотиритактних дизелів) і випускних вікон (у двотактних дизелів) [2].

Умови роботи робочої поверхні втулки характеризуються реверсивним тертям, високою тепловою і механічною напруженістю при дії абразивного та агресивного середовищ, мастильному голодуванні, що сприяють розриву захисних плівок, які розділяють поверхні тертя, тому втулки зношуються в основному через адгезійне руйнування. Залежно від властивостей матеріалу та умов тертя цей вид зношування може протікати на субмікро-, мікро- та макро- рівнях з різною інтенсивністю, досягаючи в екстремальному випадку катастрофічної форми – задиру.

Надзвичайно несприятливі умови створюються в місцях реверсування поршня, особливо біля камери згоряння, де висока температура поверхонь тертя поєднується з найбільшим питомим тиском і найменшою товщиною масляної плівки. Під час наближення поршня до ВМТ за короткий час температура мастильної плівки зростає до 350…400 °С. При цьому йде інтенсивне випаровування мастила та зменшення товщини плівки. Також слід зазначити, що збільшення вмісту сірки в паливі з 0,1 до 0,5 % призводить до зростання зносу втулок циліндрів внаслідок посилення газової та кислотної корозії та абразивного зношування. У формуванні мастильної плівки велику роль грає швидкість переміщення деталей щодо один одного, форма та матеріал кілець, а також їх конструкція. Очевидно, що найважчі умови роботи плівки складаються у високотемпературній зоні поблизу ВМТ, де в період зміни напрямку руху поршня може мати місце тертя як за умовою граничного мащення, також і сухого мащення (без мастила між поверхнями) [3].

У сучасному машинобудуванні використовується велика кількість методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя. Найбільш поширеними технологічними методами підвищення зносостійкості та, відповідно, надійності втулок циліндрів є:

- створення нових матеріалів для виготовлення втулок;
- формування оптимальних параметрів макро- та мікроструктури поверхні методом хонінгування;
- лазерне загартування робочої поверхні;
- нанесення антифрикційних покриттів полум'яним напиленням та гальванічним хромуванням;
- формування зносостійких тонкоплівкових покриттів шляхом використання триботехнічних матеріалів;
- керування реологічними характеристиками мастильного матеріалу, що використовується в системах мащення циліндрів [4].

Створення нових матеріалів. Провідні дизелебудівні фірми постійно проводять інтенсивні дослідження щодо пошуку нових матеріалів для втулок циліндрів дизелів, спрямовані на підвищення механічних властивостей та зносостійкості чавуну (як основного компоненту, що входить до їх складу). Основна вимога до нових матеріалів – висока механічна міцність, яка дозволила б підвищити тиск у циліндрах дизеля для подальшого збільшення циліндрової потужності та зниження питомої витрати палива. Разом з тим нові матеріали повинні мати високу зносостійкість для забезпечення довговічної роботи дизелів на низькоякісному важкому паливі.

Довговічність втулок циліндрів залежить від температури на поверхні тертя в районі верхнього компресійного кільця, питомого тиску в парі «втулка – поршневе кільце», товщини мастила та її властивостей, антифрикційних властивостей матеріалу втулки та поршневого кільця та ін.

Суттєво підвищити твердість і зносостійкість робочої поверхні втулок циліндрів можна нанесенням зносостійких покриттів, загартуванням поверхні та формуванням металокерамічних покриттів шляхом застосування триботехнічних матеріалів, що вводяться в мастило.

Хонінгування верхньої поверхні втулки. З метою підвищення довговічності пари тертя «втулка – поршневе кільце» застосовується метод формування зносостійкої поверхні втулок циліндрів ДВЗ шляхом керування мікрогеометрією поверхневих шарів деталей з використанням методу хонінгування.

Сформований таким способом мікрорельєф дозволяє стабільно утримувати мастило на стінках циліндрів, внаслідок чого утворюється достатня по товщині мастильна плівка, покращується мащення та охолодження навантажених деталей, мінімізуються втрати на тертя та швидкість зношування.

Слід зазначити, що після хонінгування іноді виконують наступне нанесення антифрикційного покриття для підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнта тертя.

Лазерне зміцнення робочої поверхні втулок циліндрів головних суднових дизелів. Останнім часом для підвищення твердості робочих поверхонь втулок циліндрів використовують потужні лазери. Вони дозволяють здійснювати локальне нагрівання ділянок внутрішньої поверхні втулки із заданою (регульованою) інтенсивністю, при цьому не потрібне примусове охолодження нагрітої ділянки. Таким чином, відбувається поверхневе загартування чавуну (як основного компонента, що входить у матеріали циліндрової втулки).

Напруги, що виникають у поверхневому шарі, підданому лазерному зміцненню, не повинні перевищувати допустиму межу, оскільки утворюються при цьому крихкі ділянки можуть бути причиною виникнення тріщин. Для зменшення залишкової напруги, ймовірності утворення тріщин і крихкого руйнування загартованих ділянок у втулці необхідно, щоб зміцнені ділянки чергувалися з неукріпленими. Загартування проводиться окремими невеликими ділянками як утворюючою циліндра, так і по гвинтовій лінії.

Процес лазерного зміцнення дедалі більше застосовується під час виготовлення втулок циліндрів середньообертових дизелів (через їх менший розмір). Низький коефіцієнт тертя і спеціальна конфігурація зміцнених зон робочої поверхні втулок циліндрів дозволяють використовувати поршні і кільця, що меншою мірою потребують мащення, що було встановлено при їх експлуатації дизелебудівними фірмами. Завдяки високим трибологічним характеристикам та значному збільшенню ресурсу пари тертя додаткові капітальні витрати на зміцнені втулки циліндрів швидко окупаються.

Нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню втулок циліндрів суднових дизелів найчастіше виконується гальванічним методом хромування та плазмовим напиленням. Під час вибору матеріалів, методів відновлення та зміцнення втулок циліндрів слід мати на увазі наступне: збільшення коефіцієнта тертя у сполученні або підвищений знос будь-якої поверхні сполучення ЦПГ призводить до підвищеного зносу всіх інших деталей внаслідок утворення абразивних частинок та погіршення експлуатаційних умов (зміна мікро- та макрогеометрії сполучених поверхонь і т.д.).

Однак даний метод відновлення та зміцнення втулок циліндрів не знайшов широкого застосування через високу собівартість процесу хромування, необхідність витрат на очищення стічних вод, а також відсутність технології нанесення хромових покриттів товщиною понад 0,4 мм.

Відновлення та зміцнення втулок циліндрів дизелів плазмовим напиленням також дозволяє підвищити довговічність втулок. Однак даний метод не знайшов широкого застосування під час відновлення та зміцнення втулок циліндрів внаслідок низької адгезійної та когезійної міцності покриття та великої ймовірності руйнування покриття в разі роботи двигуна в екстремальних умовах.

Формування зносостійких тонкоплівкових покриттів шляхом використання органо-неорганічних тріботехнічних матеріалів. В даний час велика група триботехнічних матеріалів застосовується для зміцнення поверхонь тертя шляхом модифікування і формування на сполучених поверхнях тонкоплівкових антифрикційних покриттів, які, як правило, перевершують зносостійкі покриття, отримані під час застосовування традиційних технологічних методів зміцнення. Їх позитивний ефект обумовлений здатністю цих матеріалів утворювати на поверхнях тертя тонкі плівки, що складаються з частинок, орієнтованих паралельно поверхні тертя. Ці плівки (або шари) розділяють тертьові поверхні, згладжують їх мікрорельєф, а у разі тертя без мастила переводять його в тертя внутрішнє, при якому зсув відбувається всередині шару частинок, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення катастрофічних видів зношування в трибосполученнях (схоплювання, задир).

Недоліком методу використання органо-неорганічних тріботехнічних матеріалів є наступні технологічні обмеження:

- для забезпечення працездатності пари тертя «втулка – поршневе кільце» необхідно постійно підтримувати певну концентрацію цих м'яких металів у мастилі;
- складність створення стійкої суспензії частинок цих металів у мастилі.

Найбільш перспективними триботехнічними матеріалами для присадок до моторних мастил і трибомодифікування під час ремонту деталей є органо-неорганічні композиції, що містять у великій кількості Si, Al, Sn, Cr та ін. Модифікація поверхонь тертя здійснюється органо-неорганічними матеріалами фрикційним або ультразвуковим методом з постійним контролем технології та визначенням товщини та дисперсності нанесеного шару [5].

Наведені методи відносяться до таких, що використовуються на етапі виробництва втулок дизелів або під час їх ремонту чи поновлення. Під час експлуатації суднових ДВЗ одним з найбільш ефективних методів зниження зносу циліндрових втулок та підвищення через це їх надійності є регулювання реологічних характеристик мастильних матеріалів. Перш за все до них відносяться додавання до моторного мастила спеціальних поверхнево-активних речовин та визначення оптимального дозування мастила на дзеркало циліндрової втулки (для циліндрових систем мащення), а також оптимального періоду понов-

лення експлуатаційних характеристик моторного мастила (для циркуляційних систем мащення).

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Усі існуючі методи зміцнення (за винятком використання триботехнічних матеріалів) вимагають наявності технологічного обладнання та значних матеріальних витрат. Для втулок циліндрів суднових дизелів, що мають великі величини зношування, більшість методів відновлення нанесенням покриттів та поверхневого зміцнення пов'язані зі значною собівартістю технологічного процесу (гальванічні покриття) або недостатньої адгезійної міцності покриття та основного металу (методи напилення). Найбільш перспективними триботехнічними матеріалами для присадок до моторних масел та трибомодифікування при ремонті циліндрових втулок дизелів є органо-неорганічні композиції.

Для умов експлуатації суднових дизелів на протязі гарантованого фірмами-виробниками періоду міжремонтного періоду найбільш раціональним методом зменшення зносу циліндрових втулок та підвищення їх надійності є управління реологічними характеристиками моторних мастил, що використовуються в системах мащення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. Наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

2. 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.

3. 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.

4. 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. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.

5. Budashko V., Sandler A., Glazeva O. Improvement of the Predictive Control Method for the High-Level Controller. 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024. – P. 294-297, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755561.

УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ДІОКСИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Куропятник О.А., доктор філософії, докторант
https://orcid.org/0009-0008-2565-5771
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: *розглянута можливість управління емісією діоксидів вуглецю під час використання у суднових дизелях палива біологічного походження. Наведені результати досліджень, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32. Під час досліджень дизелі експлуатувались на паливних сумішах, які складались з палива нафтового походження DMA10 або RMG500 та палива біологічного походження FAME. Експериментально доведено, що використання сумішей біодизельного палива та палива нафтового походження зменшує емісію діоксидів вуглецю CO_2. При цьому для суміші палива FAME та палива RMG500 це зниження знаходиться в діапазоні 5,40…23.55 %; для суміші FAME-DMA10 емісія діоксидів вуглецю CO_2 знижується на 5,31…18,80 %.*

Ключові слова: *випускні гази, емісія діоксидів вуглецю, паливна суміш, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, судновий дизель.*

CARBON DIOXIDE EMISSION MANAGEMENT WHEN USING BIO FUELS IN MARINE DIESEL ENGINES

Kuropyatnyk O.A., PhD, doctoral student
https://orcid.org/0009-0008-2565-5771
National University Odessa Maritime Academy

Abstract: *The possibility of controlling carbon dioxide emissions when using bio-based fuels in marine diesel engines is considered. The results of research conducted on Wartsila 6L32 marine diesel engines are presented. During the research, the diesel engines were operated on fuel mixtures consisting of DMA10 or RMG500 petroleum fuel and FAME bio-based fuel. It has been experimentally proven that the use of biodiesel and petroleum fuel mixtures reduces CO_2 emissions. At the same time, for the FAME and RMG500 fuel mixtures, this reduction is in the range of 5.40–23.55 %; for the FAME-DMA10 mixture, CO_2 emissions are reduced by 5.31–18.80 %.*

Keywords*: bio fuel, carbon dioxide emissions, exhaust gases, fuel mixture, marine diesel, petroleum fuel.*

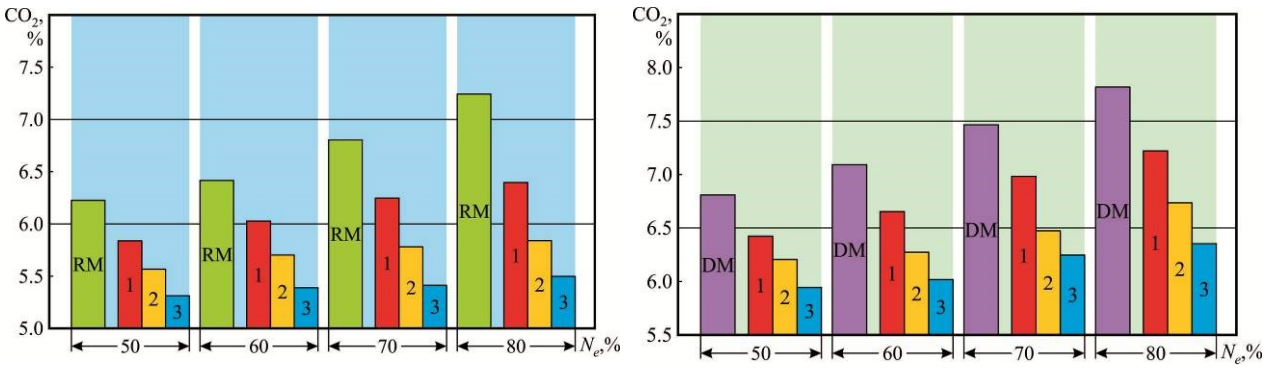
Постановка практичної проблеми. Експлуатація дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту нерозривно пов’язана з утворенням випускних газів – кінцевого продукту процесу окислення та згоряння палива, яке впорскується в циліндр. Випускні гази суднових дизелів є багатокомпонентною сумішшю до складу якої разом з небезпечними та нейтральними речовинами входять шкідливі компоненти. Частина з них (оксиди азоту NO_X, оксиди сірки SO_X та оксид вуглецю CO) відноситься до токсичних газів, частина (насамперед діоксид вуглецю CO_2) – до парникових газів [1, 2]. Зниження емісії вказаних шкідливих речовин є актуальним завданням, на розв’язання якого спрямовано багато наукових досліджень та технологічних розробок.

Мета роботи – визначення впливу палива біологічного походження на емісію діоксиду вуглецюз випускними газами суднових дизелів.

Матеріали та методи. Паливо біологічного походження відноситься до категорії альтернативних та рік у рік знаходить все більше розповсюдження під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Одним з типів палива біологічного походження є паливо, яке складають метилові ефіри жирних кислот (Fatty Acid Methyl Ester – FAME) [3, 4].

Можливість управління емісією діоксидів вуглецю під час використання палива FAME виконувалась на суднових дизелях Wartsila 6L32. Чотири подібних дизеля входили до складу допоміжної енергетичної установки спеціалізованого морського судна класу Container Ship, призначеного для перевезення 8600 TEU. Кількість дизелів дозволяла виконувати дослідження на паливних сумішах, які складались з палива нафтового походження (DMA10, що використовувалось під час знаходження судна в зонах спеціального екологічного контролю SECAs та RMG500, що використовувалось під час знаходження судна поза SECAs) та палива біологічного походження FAME. При цьому, палива нафтового походження RMG500 або DMA10 складали основу цих сумішей, їх вміст приймався 70 %, 80 та 90 %. Решту суміші (30 %, 20 % та 10 %) складало паливо біологічного походження FAME.

Концентрації діоксиду азоту CO_2 у випускних газах вимірювалась та автоматично фіксувались системою діагностики та контролю параметрів роботи дизелів [5]. Дослідження виконувались на навантаженнях, що відповідали 50 %, 60 %, 70 % та 80 % від номінального [6, 7]. Результати вимірювань надані у таблицях 1, 20 та відображені на діаграмах – рис. 1.



а) *б*)

Рисунок 1 – Емісія діоксиду вуглецю під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32:
а – під час використання палива RMG500 та його суміші с біодизельним паливом FAME;
б – під час використання палива DMA10 та його суміші с біодизельним паливом FAME;
RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміш палива RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % палива FAME відповідно

Таблиця 1 – Емісія діоксиду вуглецю, CO_2, %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32

Навантаження, %	Вид палива			
	RMG500 (100 %)	RMG500 (90 %) + FAME (10 %)	RMG500 (80 %) + FAME (20 %)	RMG500 (70 %) + FAME (30 %)
50	6,22	5,88	5,62	5,31
60	6,43	6,03	5,72	5,40
70	6,78	6,25	5,80	5,46
80	7,22	6,42	5,86	5,52

Таблиця 2 – Емісія діоксиду вуглецю, CO_2, %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32

Навантаження, %	Вид палива			
	DMA10 (100 %)	DMA10 (90 %) + FAME (10 %)	DMA10 (80 %) + FAME (20 %)	DMA10 (70 %) + FAME (30 %)
50	6,78	6,42	6,18	5,88
60	7,03	6,61	6,27	6,03
70	7,47	6,97	6,5	6,27
80	7,82	7,18	6,68	6,35

Екологічність роботі морського судна за емісією діоксиду вуглецю може бути визначена за виразами:

$$\Delta CO_2^+ = \frac{CO_2^{RMG} - CO_2^{FAME}}{CO_2^{RMG}} \cdot 100\%,\ 100\ \Delta CO_2^+ = \frac{CO_2^{DMA} - CO_2^{FAME}}{CO_2^{DMA}} \cdot 100\%;$$

в яких $CO_2^{RMG}, CO_2^{DMA}, CO_2^{FAME}$ – емісія діоксидів вуглецю під час використання палива нафтового походження RMG500 або DMA10, а також їх суміші з біодизельним паливом FAME з відповідною концентрацією, %.

З урахуванням експериментальних даних, що наведені у таблицях 1, 2, розрахункові значення ΔCO_2^+ узагальнені у таблицях 3, 4.

Таблиця 3 – Екологічність роботі морського судна за емісією діоксидів вуглецю, ΔCO_2^+, %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32

Навантаження, %	Вид палива		
	RMG500 (90 %) + FAME(10 %)	RMG500 (80 %) + FAME(20 %)	RMG500 (70 %) + FAME(30 %)
50	5,47	9,65	14,63
60	6,22	11,04	16,02
70	7,82	14,45	19,47
80	11,08	18,84	23,55

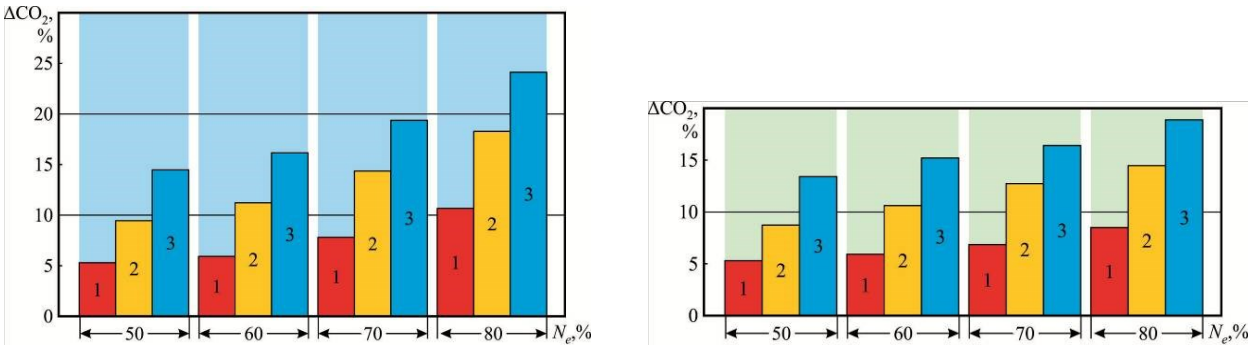
Таблиця 4 – Екологічність роботі морського судна за емісією діоксидів вуглецю, ΔCO_2^+, %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32

Навантаження, %	Вид палива		
	DMA10 (90 %) + FAME(10 %)	DMA10 (80 %) + FAME(20 %)	DMA10 (70 %) + FAME(30 %)
50	5,31	8,85	13,27
60	5,97	10,81	14,22
70	6,69	12,99	16,06
80	8,18	14,58	18,80

Для кращої візуалізації, результати, що наведені у таблицях 3, 4, відображені на діаграмах – рис. 2.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

Палива біологічного походження, одним з яких є паливо FAME, основу якого складають метилові ефіри жирних кислот сприяють покращенню екологічних показників роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Утворення паливних сумішей, основу яких складають палива нафтового походження (зі вмістом 70…90 %), рештою яких є паливо біологічного походження FAME можливо безпосередньо на судні.



а) *б*)

Рисунок 2 – Екологічність роботі морського судна за емісією діоксидів вуглецю під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32:
а – під час використання суміші палива RMG500 та біодизельного палива FAME;
б – під час використання суміші палива DMA10 та біодизельного палива FAME;
1, 2, 3 – суміш палива RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % палива FAME відповідно

Використання в дизелях морських суден паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, змінює (порівняно з експлуатацією дизеля на паливі нафтового походження) процеси окислення та згоряння, що призводить до зміни термодинаміки процесу згоряння. Це стає підставою зміни екологічних, економічних та температурних показників дизеля. Зокрема, зміна екологічних показників виявляється в зменшенні емісії діоксидів вуглецю з випускними газами. Це пов'язано з іншим (в порівняні з нафтовим паливом) структурним та фракційним складом палива біологічного походження.

Використання сумішей палива біологічного походження та палива нафтового походження зменшує емісію діоксидів вуглецю CO_2. При цьому для суміші палива FAME та палива RMG500 це зниження знаходиться в діапазоні 5,40…23.55 %; для суміші FAME-DMA10 емісія діоксидів вуглецю CO_2 знижується на 5,31…18,80 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.

2. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

3. 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. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.

4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.

5. Budashko V., Sandler A., Glazeva O. Improvement of the Predictive Control Method for the High-Level Controller. 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024. P. 294-297, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755561.

6. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ПОГЛИНАННІ ДІОКСИДУ СІРКИ У МОРСЬКИХ СКРУБЕРАХ

Удолатій В.Б., асистент
https://orcid.org/0009-0004-0069-5161
Національний університет "Одеська морська академія", Україна

Анотація: *У роботі розглянуто процес поглинання діоксиду сірки (SO_2) краплями рідини в системах мокрого очищення димових газів. Проаналізовано фізико-хімічні основи процесу – розчинність, хімічні реакції у водній фазі та механізми масопереносу. Розроблено математичну модель однієї краплі з усередненими параметрами для чистої води, яка поєднує опис хімічної рівноваги та динаміки масопереносу. Наведено огляд основних теорій масопереносу (плівки, проникнення, оновлення поверхні) та здійснено порівняння результатів моделювання з літературними даними. Отримані результати показали задовільну узгодженість із відомими моделями, що підтверджує правильність підходу.*

Ключові слова: *масоперенос, абсорбція, діоксид сірки, скрубер, модель краплі.*

ANALYSIS OF MASS TRANSFER MODELS FOR SULFUR DIOXIDE ABSORPTION IN MARINE SCRUBBERS

Udolatiy V.B., Assistant
https://orcid.org/0009-0004-0069-5161
National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Abstract: *This study investigates the absorption of sulfur dioxide (SO_2) by liquid droplets in wet gas cleaning systems. The physical and chemical fundamentals of the process – solubility, aqueous-phase reactions, and mass transfer mechanisms – are analyzed. A mathematical model of a single droplet with averaged parameters for pure water is developed, combining the description of chemical equilibrium and mass transfer dynamics. The main theories of mass transfer (film theory, penetration theory, and surface renewal theory) are reviewed, and the results of the developed model are compared with available literature data. The comparison demonstrates good agreement, confirming the adequacy of the proposed approach.*

Keywords: *mass transfer, absorption, sulfur dioxide, scrubber, droplet model.*

Наявність забруднюючих речовин у димових газах є відкритим питанням, а оксиди сірки є одними з найшкідливіших газоподібних забруднювачів. Європейський Союз встановив напрямки щодо скорочення викидів SO_2, а IMO обмежила допустимі рівні сірки в паливі, що використовується для суден. Діоксиди сірки утворюються під час згоряння паливної сірки та виходять з камери згоряння разом з димовими газами. Основні заходи щодо зменшення викидів включають використання палива з низьким вмістом сірки, видалення її перед спалюванням або вплив на параметри в камері згоряння для запобігання її утворенню. Але більш поширеним рішенням є очищення відпрацьованих газів. Видалення діоксиду сірки з відпрацьованих газів, зазвичай здійснюється за допомогою процесу мокрого очищення у скруберних системах, де забруднений газ контактує з рідиною для очищення. Найпоширеніші конструкції мокрих скруберів включають ущільнені шари, пластинчасті скрубери, скрубери Вентурі та розпилювальні вежі [1, 8].

Розпилювальні вежі – це кількаметрові резервуари, у яких рідина розпилюється через форсунки, утворюючи краплі, які інтенсивно контактують із газовим потоком. Завдяки цьому збільшується площа поверхні розділу фаз і покращується поглинання діоксиду сірки (SO_2) з димових газів. Як абсорбенти, зазвичай використовують водні розчини лугу – вапняну суспензію, гідроксид магнію, гашене вапно або каустичну соду. Морська вода

чи навіть прісна вода, також, мають певні абсорбційні властивості. Ефективність видалення SO_2 у таких системах може перевищувати 90%. На морських суднах, які працюють на важкому паливі, найзручніше застосовувати морську воду.

Особливості роботи розпилювальних скруберів та проблеми їх експлуатації активно досліджуються як експериментально, так і за допомогою числових методів. Вчені вивчали розчинність, рівновагу та механізми поглинання SO_2 у чистій й морській воді, а також створювали моделі, які описують ці процеси. Однак достатньо достовірних експериментальних даних о поглинанні газів окремими краплями все ще недостатньо, а існуючі моделі містять багато припущень[2, 9].

Метою цієї роботи є розробка моделі поглинання SO_2 краплями чистої води та визначення підходів до розрахунку коефіцієнтів масопереносу.

Зосередимось на моделюванні хімічних реакцій у водній фазі та розглянемо сучасні підходи, які застосовують для моделювання процесу масопереносу.

Поглинання діоксиду сірки краплями рідини визначається двома основними процесами:

- хімічними реакціями, які задають рівноважну концентрацію SO_2 у рідині – тобто максимальну кількість речовини, яка може розчинитися;
- масопереносом через межу газ-рідина, який визначає швидкість поглинання.

Розглянемо умови рівноваги.

Під час контакту газової суміші з рідиною компоненти газу розчиняються в ній у кількості, пропорційній їх парціальному тиску. Це описується законом Генрі, який добре підходить для процесів абсорбції SO_2 з димових газів. У [3] детально розглянуто фізичну суть, склад розчину та вплив температури, а також навів значення констант Генрі для різних речовин. Константа розчинності Генрі визначається як:

$$H_{SO_2}^{c_a} = c_{SO_2} P^{-1}. \quad (1)$$

де c_a – концентрація речовини у водній фазі, (моль/м³);
P – тиск (Па).

Температурну залежність константи Генрі можна описати рівнянням Вант-Гоффа:

$$H(T) = H^{\theta} exp\left(\frac{-\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{\theta}}\right)\right). \quad (2)$$

де θ – показник ступеня, позначає еталонні значення температури та постійної Генрі. У рівнянні (2) представлені параметри дійсні лише для обмеженого діапазону температур. Наразі для H^{θ} використовується значення $1{,}2 \times 10^{-2}$, а значення $-\Delta H/R$ становить 2850 K.

Хімія рідкої фази.

Для визначення розчинності діоксиду сірки у воді, одного лише закону Генрі замало, оскільки він не враховує вплив хімічних реакцій у рідкій фазі. У водних розчинах діоксид сірки зазнає реакцій дисоціації, утворюючи бісульфітні та сульфітні іони. Розчинення газоподібного SO_2 у нереакційній водній формі є першою реакцією і вона регулюється законом Генрі. Далі йде дисоціація SO_2, утворюючи бісульфіт та іон гідронію, де замість H^+ використано H_3O^+. Наведені нижче реакції перебувають у рівновазі і є достатньо швидкими, а коефіцієнт реакції для першої дисоціації дорівнює:

$$Q_I = \frac{c_{HSO_3^-} c_{H_3O^+}}{c_{SO_{2aq}}}, \quad (3)$$

Дисоціація діоксиду сірки у воді відбувається у дві стадії, де друга – це реакція бісульфіту з водою, що утворює сульфіт. Нижче наведено константу рівноваги цієї реакції з її температурною залежністю:

$$Q_{II} = \frac{c_{SO_3^{2-}} c_{H_3O^+}}{c_{HSO_3^-}}, \quad (4)$$

Друга реакція дисоціації повільніша за першу і часто може бути знехтована через низьку концентрацію сульфіт-іонів. Після визначення змінних, розрахунку допоміжних

значень та використовуючи константу Генрі, обчислюємо розчинене SO_{2aq}. Ця концентрація є вхідним параметром у системі рівнянь, що обчислюють концентрацію речовини. Оскільки є три невідомі (HSO_3^-, SO_3^{2-} та H_3O^+), а реакцій дисоціації лише дві, для «замкнення» системи необхідне додаткове рівняння. Електронейтральність зазвичай використовується як додаткова умова у водних розчинах:

$$c_{H_3O^+} = c_{HSO_3^-} + 2c_{SO_3^{2-}}. \quad (5)$$

Після розв'язання системи загальна концентрація сірки підсумовується та переводиться з молей на кілограм у грами на моль.

$$\text{Загальна сірка} = c_{SO_{2aq}} + c_{HSO_3^-} + c_{SO_3^{2-}}. \quad (6)$$

На (рис. 1) показані хімічні реакції рідкої фази.

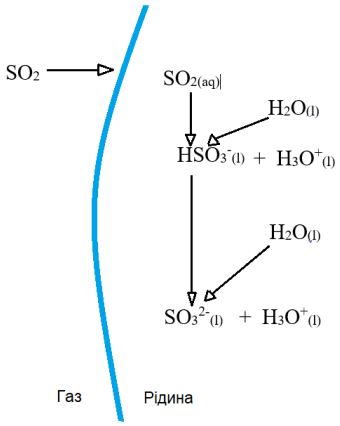


Рисунок 1 – Хімічні реакції рідкої фази

Згідно з рівнянням (6), концентрація діоксиду сірки – це загальна сірка, що поєднує внесок розчиненого $SO_{2(aq)}$, HSO_3^- та SO_3^{2-}, у грамах на кілограм.

Динаміка масопереносу.

Окрім рівноважної концентрації, ще одним параметром, що впливає на масообмін на межі розділу газ-рідина, є коефіцієнт масопереносу. Вибір моделі масопереносу є складним, оскільки краплі поводяться по-різному в коротких часових проміжках. На процес можуть впливати численні параметри, такі як швидкість і розмір крапель, турбулентність, пульсації та внутрішня циркуляція. Крім того, умови довкілля можуть істотно змінювати інтенсивність поглинання, а взаємодія зі стінкою має значний вплив на властивості крапель та взаємодію газ-рідина [5, 6, 7]. Значна частина досліджень зосереджена на загальному масопереносі по прямих поверхнях: у схвильованих системах або для бульбашок, які підіймаються. Поширення цих моделей на краплі, що падають з кінцевою швидкістю, є сумнівним.

Загальний коефіцієнт масопереносу $K_{SO_2,tot}$, складається з коефіцієнтів масопереносу газової $(k_{SO_{2,g}})$ та рідкої $(k_{SO_{2,l}})$ частин. Опір кожної фази впливає на загальний коефіцієнт масопереносу, а їх співвідношення визначає, з якої сторони – рідинної чи газової – відбувається перенесення. У нашому випадку домінує рідка фаза, і це підтверджується літературними даними [10]. У роботі застосована модель з зосередженими параметрами, яка, зазвичай, використовується в обчислювальних моделях динаміки рідин для абсорбції, але внутрішній розподіл концентрації при цьому не враховується. Через це результати можуть відрізнятися від детальних моделей, які описують радіальний розподіл усередині краплі:

$$\frac{1}{K_{SO_2,tot}} = \frac{1}{k_{SO_{2,g}}} + \frac{H_{SO_2}}{E_{SO_2} k_{SO_2,l}}. \quad (7)$$

де E_{SO_2} – коефіцієнт посилення, який враховує більшу рушійну силу в рідкій плівці порівняно з поглинанням без хімічних реакцій [11].

Тут коефіцієнт масопереносу з боку газу розраховується за рівнянням Ранца-Маршалла, яке є поширеним підходом:

$$Sh = \frac{k_{SO_{2,g}} RTd}{D_{SO_{2,g}}} = 2 + 0.69Re_1^{0.5}Sc^{0.33}. \quad (8)$$

де *Sh, Re* та *Sc* – це безрозмірні величини Шервуда, Рейнольдса та Шмідта відповідно;
R – це універсальна газова стала,
T – температура,
d – діаметр краплі,
$D_{SO_{2,g}}$ – бінарний коефіцієнт дифузії SO_2 у повітрі.

Одна з перших моделей масопереносу з боку рідини базувалася на теорії плівки, описаній Вітменом, розробленій для поглинання газів на горизонтальних перемішуваних поверхнях. Вона припускає, що поверхня рідини є стаціонарною, що всередині краплі немає турбулентного руху, і що масоперенос обмежений дифузією через плівку поблизу поверхні. У рівнянні нижче $D_{SO_{2,l}}$– це коефіцієнт дифузії SO_2 у воді:

$$k_l^{film} = 10\frac{D_{SO_{2,l}}}{d}. \quad (9)$$

Всередині падаючих крапель існує значна циркуляція внаслідок напруги зсуву, що робить теорію плівок непридатною для низки застосувань. Внутрішня циркуляція збільшує масообмін, і навіть маленькі краплі можуть мати більший k_l, ніж передбачає теорія плівок. Крім того, експериментальні дані показали, що пропорційність між коефіцієнтом масообміну та коефіцієнтом дифузії є нелінійною, а масштабується зі ступенем 1/2 [2].

Одним з найбільш поширених підходів є теорія проникнення Хігбі, яка припускає, що внутрішня турбулентність поширюється на поверхню, а вихори приносять частину свіжої рідини до межі розділу. Ця теорія враховує нестабільність процесу масопереносу за допомогою параметра часу контакту, який важко оцінити для конкретних застосувань і ще важче узагальнити [11].

$$k_l^{P.T.} = 2 * \sqrt{\frac{D_{SO_{2,l}}}{t\pi}}. \quad (10)$$

Додатковим розширенням теорії проникнення є теорія оновлення поверхні, запропонована Данквертсом [2]. У ній поверхневий елемент може бути замінений у будь-який момент, що пояснює непередбачуваність турбулентного потоку всередині краплі:

$$k_l^{S.R.} = \sqrt{D_{SO_{2,l}} s}. \quad (11)$$

де *s* – швидкість оновлення поверхні, яка загалом не є відомою,
t – час контакту у теорії проникнення.

Ці параметри потребують обережного поводження, оскільки вони суттєво впливають на значення *k*, але не існує загальної моделі для всіх застосувань та умов. Інше розширення моделі можливе шляхом включення впливу коливань крапель та розтягнення поверхні. Ангело та ін. розробили модель, яка також масштабується з $D^{1/2}$ та включає розтягнення поверхні через параметр α, та моделює час коливань τ за моделлю Ламба [13], з поверхневим натягом σ та густиною рідини ρ:

$$k_l^{Angelo} = \sqrt{\frac{D_{SO_{2,l}}}{\pi t}\left(1 + \alpha + \frac{3\alpha^2}{8}\right)}$$

$$\tau = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{\rho_l d^3}{\sigma}}. \quad (12)$$

Нарешті, модель Амокрейна та ін. [14] включає міжфазну швидкість u_* та частоту коливань ω, які пов'язують напруження зсуву з коефіцієнтом масопереносу.

$$k_l^{Amokrane} = w\sqrt{\frac{D_{SO_{2,l}} u_*}{d}} u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \quad (13)$$

Існує велика кількість моделей масопереносу, але моделі, згадані тут, є найпоширенішими та більш підходящими для розглянутого застосування.

Зрештою, молярний потік через межу розділу газ-рідина розраховується наступним чином:

$$N_{SO_2} = K_{SO_2,tot}\left(P'_{SO_2} - H_{SO_2} c_{SO_{2(sq)}}\right). \quad (14)$$

де P' – парціальний тиск.

Для рівноважного аналізу був використаний підхід Андреасена і Майера [16]. Автори наводять результати своєї моделі для визначення рівноважних концентрацій SO_2, що поглинається чистою водою. Модель застосовується не тільки для крапель води, але й для умов на межі розділу рідина-газ. Однак вона не надає інформації щодо динаміки поглинання в краплі. Порівняння моделі, реалізованої в Matlab з результатами, Андреасена та Майєра наведено для чистої води (рис. 2).

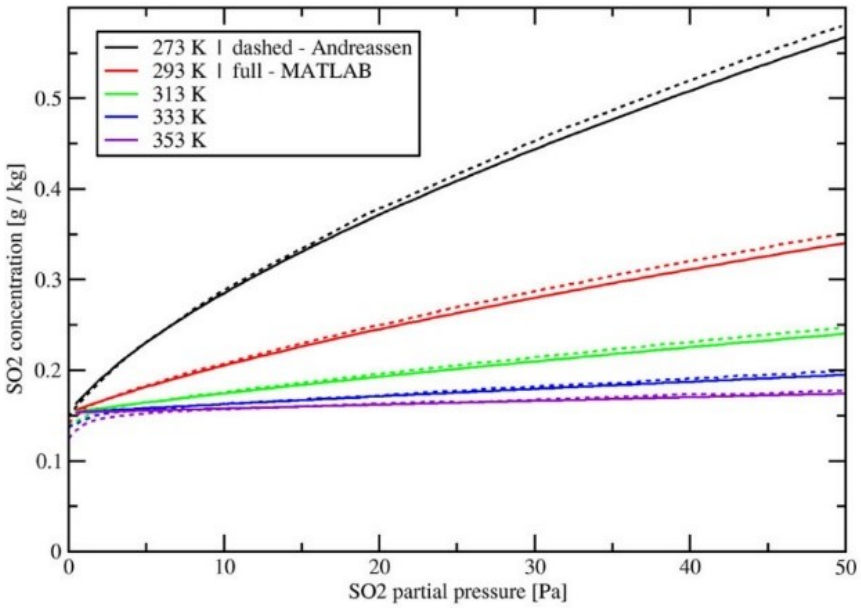


Рисунок 2 – Порівняння моделі Matlab з літературними даними [16].

Зауважимо, що реалізована в Matlab модель з усередненими параметрами достатньо добре відтворює рівноважні концентрації. Збільшення внаслідок підвищення парціального тиску не є лінійним (як це було б лише за законом Генрі), а є криволінійним через хімічні реакції в рідкій фазі. Високої концентрації при тиску близькому до нуля можна було б уникнути, якби збільшилася роздільна здатність розрахункового тиску. Можна зробити висновок, що узгодженість є задовільною і що результати відтворені правильно.

Висновки. У роботі представлено спрощену модель масопереносу діоксиду сірки під час його поглинання краплями води. Модель поєднує рівноважний опис хімічних реакцій у водній фазі з оцінкою коефіцієнтів масопереносу. Проведене порівняння з даними Андреасена і Майєра підтвердило адекватність розробленого підходу для оцінки рівноважних концентрацій SO_2. Результати дослідження показують, що домінуючий опір масопереносу припадає на рідку фазу, а хімічні реакції суттєво впливають на ефективність поглинання. Отримані результати показали задовільну узгодженість із відомими моделями, що підтверджує правильність підходу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Удолатій, В.Б. Підвищення енергоефективності суден – ключовий аспект стратегії зі зниження шкідливих викидів оксидів сірки. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 30, 2025; Glasgow, Scotland, UK), 184 – 188.

2. Bešenić, Tibor, Vujanović, Milan, Baleta, Jakov, Pachler, Klaus, Samec, Niko and Hriberšek, Matjaž. "Numerical analysis of sulfur dioxide absorption in water droplets" *Open Physics*, vol. 18, no. 1, 2020, pp. 104-111.

3. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmos Chem Phys. 2015;15(8):4399–981.

4. Сандлер, А. К., Удолатій, В. Б. Волоконно-оптичний засіб контролю суднових холодильних установок // Scientific method: reality and future trends of researching: collection of scientific papers "SCIENTIA" with Proceedings of the V International Scientific and Theoretical Conference, December 13, 2024. Zagreb, Republic of Croatia: International Center of Scientific Research. – 2024. – P. 183 - 191. DOI: https://doi.org/ 10.36074/scientia-13.12.2024.

5. Walcek C, Wang PK, Topalian JH, Mitra SK, Pruppacher HR. An experimental test of a theoretical model to determine the rate of which freely falling water drops scavenge SO2 in air. Am Meteorol Soc. 1981;871–6.

6. Nishimura A, Weller H, Maruoka H, Takayanagi M, Ushiki H. Dynamics of a dry-rebounding drop: observations, simulations, and modeling. Open Phys. 2018 May;16:271–84.

7. Ge W-K, Lu G, Xu X, Wang X-D. Droplet spreading and permeating on the hybrid-wettability porous substrates: a lattice Boltzmann method study. Open Phys. 2016; 14.

8. Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б., Рябцов, О. В. Автоматизований волоконно-оптичний пристрій моніторингу витоку газу на суднах-газовозах // Automation of Technological and Business Processes. – 2025. №– 17 (3). – С. 13 - 20. DOI: 10.15673/atbp.v17i3.3163

9. Удолатій, В. Б. Пристрій для автоматизованого контролю міри кислотності води у системі охолодження // Automation of Technological and Business Processes. – 2024. №– 16 (4). – С. 68 - 72. DOI: 10.15673/atbp.v16i4.294

10. Kiil S, Michelsen ML, Dam-Johansen K. Experimental investigation and modeling of a wet flue gas desulfurization pilot plant. Ind Eng Chem Res. 2002;37(7):2792–806.

11. Marocco L, Inzoli F. Multiphase Euler-Lagrange CFD simulation applied to wet flue gas desulphurisation technology. Int J Multiph Flow. 2009;35(2):185–94.

12. Brogren C, Karlsson HT. Modeling the absorption of SO_2 in a spray scrubber using the penetration theory. Chem Eng Sci. 1997;52:3085–99.

13. Angelo JB, Lightfoot EN, Howard DW. Generalization of the penetration theory for surface stretch: application to forming and oscillating drops. AIChE J. 1966;12(4):751–60.

14. Amokrane H, Saboni A, Caussade B, Experimental study and parameterization of gas absorption by water drops. AIChE J. 1994;40(12):1950–60.

15. Удолатій, В.Б., Удолатій, А.Є. Комп'ютерне моделювання показників оцінки ефективності інвестиційних проектів / В.Б. Удолатій, А.Є. Удолатій // Судовождение. – 2018. – Вып. 28. – Одесса: НУ «ОМА» – С. 222-227. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.222-227

16. Andreasen A, Mayer S. Use of seawater scrubbing for SO_2 removal from marine engine exhaust gas. Energy Fuels. 2007;21(6):3274–9.

Секція 10. **НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ: ПОШУКИ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

ДОСЛІДЖЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМАХ RTB

Гунченок Ю.А., д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0003-4423-8267
Мартинович Л.Я., старший викладач
Іванов О.О., магістр
Одеський національний університет імені І.І.Мечникова

Анотація: *У сучасному середовищі цифрової реклами прогнозування ймовірності кліку (Click-Through Rate, CTR) є фундаментальною задачею, особливо в рамках аукціонів у реальному часі (Real-Time Bidding, RTB), де точність прогнозу безпосередньо впливає на фінансовий результат платформ та ефективність рекламних кампаній. В умовах воєнного стану в Україні, коли бізнес, медіа та волонтерські ініціативи працюють під постійним тиском ресурсних обмежень, кіберзагроз і перебоїв інфраструктури, задача точного та обчислювально ефективного прогнозування CTR набуває додаткової стратегічної ваги. Вона забезпечує більш раціональне використання рекламних бюджетів, підвищує стійкість цифрових комунікацій та сприяє підтримці економічної активності. Центральною проблемою прогнозування CTR є обробка високорозмірних та надзвичайно розріджених категоріальних ознак, а також суттєва незбалансованість класів. У роботі детально описано архітектуру гібридної ансамблевої моделі «Сума двох експертних думок», яка поєднує можливості градієнтного бустингу дерев рішень (Gradient Boosting Decision Trees, GBDT) як нелінійного перетворювача ознак (GBDT→LR) та потужного древоподібного предиктора. Запропонована модель орієнтована на впровадження в промислові системи на стороні попиту (Demand-Side Platform, DSP), що працюють під жорсткими часовими обмеженнями та в умовах нестабільності трафіку, характерних для воєнного часу. Експериментальне оцінювання, проведене на наборі даних Avazu, підтверджує, що розроблена архітектура забезпечує статистично значуще підвищення точності прогнозування (AUC та Log Loss) порівняно з базовими та ансамблевими моделями, зберігаючи прийнятну обчислювальну складність, що є критично важливим для стійких рекламних інфраструктур у воєнних умовах.*

Ключові слова: *прогнозування CTR, RTB, DSP, гібридний ансамбль, GBDT, розрідженість даних, Log Loss, AUC, Avazu Dataset.*

RESEARCH AND APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN RTB SYSTEMS

Gunchenko Y.O., Dr. of Science, Professor
Martynovych L.Ya., Senior Lecturer
Ivanov O.O., Master Student
Odesa I.I. Mechnikov National University

Abstract: *In the modern digital advertising environment, Click-Through Rate (CTR) prediction is a fundamental task, particularly within Real-Time Bidding (RTB) auctions, where prediction accuracy directly affects platform revenue and campaign effectiveness. Under the conditions of martial law in Ukraine, where businesses, media and volunteer initiatives operate under severe resource constraints, cyber threats and infrastructure disruptions, the need for accurate and computationally efficient CTR prediction becomes especially acute. Robust models for CTR prediction support more rational allocation of advertising budgets, strengthen the resilience of digital communication channels and contribute to sustaining economic activity in wartime. A core challenge in CTR prediction involves managing high-dimensional and extremely sparse categorical features, coupled with significant class imbalance. This paper details the architecture of a Hybrid Ensemble Model — "The Sum of Two Opinions" — which in-*

tegrates the capability of Gradient Boosting Decision Trees (GBDT) as a non-linear feature transformer (GBDT→LR) and a robust tree-based predictor. The proposed model is tailored for deployment in industrial DSP systems that operate under stringent latency constraints and unstable traffic patterns typical of wartime conditions. Empirical evaluation conducted on the Avazu dataset confirms that the developed architecture yields a statistically significant improvement in prediction accuracy (AUC and Log Loss) compared to baseline and ensemble models, while maintaining acceptable computational complexity, which is crucial for resilient advertising infrastructures under martial law.

Keywords: *CTR prediction, RTB, DSP, hybrid ensemble, GBDT, data sparsity, Log Loss, AUC, Avazu dataset.*

Сучасний ринок цифрової реклами зазнає глибоких структурних змін, де програмована (автоматизована) реклама посідає домінуюче місце. Для України ці процеси відбуваються в унікальному контексті повномасштабної війни, коли цифрові канали комунікації стають критично важливими як для бізнесу, так і для державних та волонтерських інформаційних кампаній. В умовах падіння доходів, релокації населення та постійних загроз кібербезпеці особливого значення набуває максимально ефективне використання кожної одиниці рекламного бюджету.

Ключовий механізм у цій екосистемі – аукціон у реальному часі (Real-Time Bidding, RTB) – передбачає, що кожен показ оголошення є предметом індивідуального торгу, який має відбутися менш ніж за 100–150 мілісекунд. Ця жорстка вимога до швидкості є критичною для синхронного завантаження реклами без затримок для користувача, що особливо важливо за умов можливих перебоїв зв'язку та підвищеної чутливості користувачів до якості сервісу під час воєнного стану.

Платформа на стороні попиту (Demand-Side Platform, DSP) виконує роль інтелектуального ядра цієї інфраструктури. Вона повинна оперативно оцінити цінність показу, використовуючи прогностичні моделі, зокрема моделі оцінки ймовірності кліку (predicted CTR, pCTR), щоб визначити оптимальний розмір ставки. Прогнозування CTR є, по суті, задачею бінарної класифікації, метою якої є оцінка умовної ймовірності того, що користувач здійснить клік на оголошення. Формально pCTR визначається як:

$$y = P(Click = 1 \mid x)$$

де x – вектор ознак, що описує користувача, креатив та контекст показу.

У моделях оплати за тисячу показів (Cost per Mille, CPM) прогнозований CTR (pCTR) використовується для розрахунку ефективної вартості тисячі показів (effective Cost per Mille, eCPM), яка є внутрішньою ранжувальною величиною для вибору найкращого оголошення:

$$eCPM(x) = 1000 \times pCTR(x) \times CPC$$

У більш загальному випадку ставка DSP для конкретного запиту може обчислюватися за формулою:

$$Bid(x) = \upsilon \times pCTR(x) \times \alpha,$$

де υ – внутрішня оцінка вартості кліку чи конверсії;

α – коефіцієнт масштабування з урахуванням стратегії кампанії та поточного використання бюджету, а член exploration враховує необхідність дослідження нових сегментів трафіку.

Таким чином, систематичні похибки в pCTR безпосередньо призводять до недоотримання показів у цінних сегментах або переплати за нерелевантні покази.

У воєнних умовах точність pCTR безпосередньо впливає не лише на фінансові показники рекламодавців, але й на здатність швидко донести критично важливі повідомлення до цільової аудиторії (наприклад, інформацію про евакуацію, гуманітарну допомогу чи безпекові рекомендації) при мінімальних витратах.

З інженерної точки зору прогнозування CTR вважається складним завданням через природу вхідних даних та динамічність поведінки користувачів, яка в умовах воєнного

стану зазнає швидких і непередбачуваних змін. Ключові труднощі виникають через кілька чинників.

Першою фундаментальною проблемою є висока розмірність та розрідженість ознак. Значна частина ознак є категоріальними (ідентифікатор користувача, ідентифікатор пристрою, категорії додатків, рекламні кампанії тощо). При наївному кодуванні це призводить до векторів із мільйонами вимірів, де більшість компонентів дорівнюють нулю. Набір даних Avazu, обраний для емпіричного дослідження, є типовим прикладом із рівнем розрідженості понад 95 %.

Другою проблемою є суттєва незбалансованість класів. Кількість позитивних прикладів (кліків) на порядки менша, ніж негативних (покази без кліку). Це вимагає спеціалізованих методів підготовки даних, вибору метрик й калібрування прогнозованих значень, зокрема застосування вагування класів, зменшення кількості негативних прикладів та корекції оцінених ймовірностей з урахуванням реальних базових частот у виробничому середовищі.

Третім викликом є концептуальний дрейф в умовах воєнного стану. Поведінка користувачів, розподіл трафіку за регіонами, часові патерни активності можуть істотно змінюватися внаслідок релокації населення, блекаутів, обмежень доступу до інтернету та масових інформаційних кампаній. Це робить класичні стаціонарні припущення щодо даних менш придатними та вимагає моделей, стійких до таких змін, а також регулярного перенавчання на найсвіжіших даних із часовою валідацією.

Для подолання зазначених викликів у роботі застосовано поглиблені методи попередньої обробки даних, включаючи векторизацію через вбудовування ознак для перетворення високорозмірних категоріальних ознак у щільні векторні представлення.

Нехай $E \in R^{m \times D}$ – матриця вбудовувань, де m – розмір словника певної ознаки, а D –розмірність простору вбудовувань. Тоді для і-го прикладу вектор вбудовування e_i обчислюється як $e_i = E \times x_k^i$, де x_k^i – одновимірне (one-hot) кодування k-ої категорії для і-го прикладу.

На практиці розмірність D обирається в діапазоні 8–32 залежно від кількості різних значень ознаки, а самі вбудовування можуть спільно використовуватися кількома суміжними полями.

На основі аналізу особливостей даних та вимог до точності й обчислювальної ефективності було обґрунтовано архітектурний вибір гібридного ансамблевого підходу, який здатен одночасно моделювати як лінійні, так і складні нелінійні взаємодії ознак.

Запропонована модель, що отримала назву «Сума двох експертних думок» (The Sum of Two Opinions), використовує змішування логітів (logit blending) для об’єднання прогнозів двох архітектурно відмінних експертних компонентів. Така диверсифікація необхідна для зменшення систематичного зміщення помилок та підвищення стійкості до зміни розподілу даних.

Перший компонент – градієнтний бустинг дерев рішень як нелінійний перетворювач ознак (GBDT→LR) – поєднує можливості ансамблів дерев рішень (наприклад, реалізації LightGBM або XGBoost) для захоплення прихованих взаємодій ознак із простотою та інтерпретованістю логістичної регресії. На першому етапі на сирих або попередньо оброблених даних навчається модель GBDT. Після навчання кожен приклад пропускається крізь ансамбль дерев, і для кожного дерева фіксується індекс листа, у який потрапив приклад. Сукупність цих індексів формує новий розріджений вектор ознак x_{GBDT}. На другому етапі поверх цього подання навчається логістична регресія з регуляризацією, яка повертає перший прогноз P_1. Логістична регресія добре працює з розрідженими даними, має відносно низьку обчислювальну складність і забезпечує певний рівень інтерпретованості, що важливо для оперативної діагностики моделей у критичних умовах.

Другий компонент – модель градієнтного бустингу на сирих даних – використовує потужний древоподібний предиктор (наприклад, CatBoost) для прямого нелінійного мо-

делювання на сирих або мінімально трансформованих ознаках. Цей «експерт» спеціалізується на швидкому й глибокому аналізі взаємодій без необхідності ручного створення складних похідних ознак, підвищуючи загальну надійність ансамблю.

Метод фінального прийняття рішення базується на змішуванні логітів. Замість простого усереднення ймовірностей застосовується об'єднання логітів, тобто логарифмів відношення шансів:

$$L = \log\left(\frac{P}{1-P}\right)$$

Фінальний прогнозований CTR розраховується як

$$y = \sigma(w_1 \cdot L_1(x) + w_2 \cdot L_2(x))$$

де L_1 та L_2 – логіти, отримані від першого та другого компонентів відповідно;

σ – сигмоїдна функція активації,

w_1 та w_2 — вагові коефіцієнти, що оптимізуються на валідаційній вибірці.

Такий підхід дозволяє гнучко налаштовувати внесок кожного експерта, що є важливим для задачі бінарної класифікації з незбалансованими класами та можливим концептуальним дрейфом.

У контексті воєнного стану при проєктуванні архітектури додатково враховувалися такі вимоги: можливість розгортання на обмежених обчислювальних ресурсах (локальні серверні кластери, хмарні інфраструктури з обмеженим бюджетом), стійкість до часткового зникнення окремих ознак (наприклад, через зміну політики журналювання або втрату даних), а також простота оперативного моніторингу та повторного навчання моделі.

Емпірична частина роботи фокусується на перевірці гіпотези про підвищення точності гібридного ансамблю порівняно з базовими моделями. Експерименти проводилися на відкритому наборі даних Avazu, який широко використовується в науковій спільноті для порівняння моделей прогнозування CTR.

Для об'єктивної оцінки якості моделей прогнозування CTR, які працюють з незбалансованими класами, застосовуються метрики, що не залежать від порогового значення класифікації:

- Log Loss (логарифмічна втрата) використовується як функція втрат для оцінки точності прогнозу ймовірності. Чим нижче значення Log Loss, тим кращою є модель. На етапі навчання застосовується бінарна крос-ентропія.

- AUC (Area Under the ROC Curve) – площа під ROC-кривою – є стандартною метрикою для оцінки моделей бінарної класифікації. У задачі прогнозування CTR важливо також оцінювати статистичну значущість різниці AUC між моделями (наприклад, за допомогою відповідних статистичних тестів із порогом p-value < 0,05).

Було проведено порівняння розробленої гібридної моделі з низкою сучасних базових та конкурентних моделей, включаючи класичні лінійні моделі (логістична регресія), факторизаційні машини (FM, FFM), глибокі комбіновані моделі (DeepFM, Wide & Deep), а також потужні ансамблеві моделі на основі дерев (LightGBM, XGBoost, CatBoost).

Результати аналізу показали, що запропонована гібридна ансамблева модель «Сума двох експертних думок» демонструє статистично значуще підвищення точності прогнозування (за AUC та Log Loss) порівняно з окремими компонентами та базовими моделями. Перевага пояснюється здатністю архітектури GBDT→LR ефективно створювати нові ознаки, що відображають нелінійні взаємодії й є критичними в умовах високорозріджених даних, а також додатковою стійкістю ансамблю до зміни розподілу вхідних ознак.

Висновки. Запропонована робота досягла поставленої мети – розробки гібридної ансамблевої моделі для підвищення точності прогнозування CTR, яка здатна ефективно працювати в умовах високорозріджених даних, незбалансованості класів і динамічної зміни поведінки користувачів, що особливо актуально в умовах воєнного стану.

Основні результати дослідження можна узагальнити так. Узагальнено теоретичні засади екосистеми аукціонів у реальному часі, показано роль DSP та ключову функцію

прогнозування CTR у формуванні ставок, особливо в контексті воєнного стану, коли кожна одиниця рекламного бюджету має бути використана максимально ефективно. Аналіз набору даних Avazu підтвердив, що ключовими труднощами є висока розмірність, екстремальна розрідженість ознак та незбалансованість класів. Додатково наголошено на важливості врахування концептуального дрейфу, характерного для кризових та воєнних ситуацій.

Розроблено та реалізовано нову архітектуру гібридної моделі «Сума двох експертних думок» з використанням компонента GBDT→LR для нелінійного перетворення ознак та змішування логітів для агрегації прогнозів двох незалежних експертів. Емпіричне оцінювання підтвердило, що розроблена гібридна модель демонструє статистично значуще підвищення точності прогнозування (AUC та Log Loss) порівняно з обраними базовими моделями (FM, DeepFM, LightGBM/CatBoost), зберігаючи прийнятний рівень обчислювальної складності.

Показано, що запропонована архітектура є придатною для розгортання у високонавантажених промислових RTB-системах і може розглядатися як елемент підвищення стійкості цифрової рекламної інфраструктури в умовах воєнного стану, коли доступ до ресурсів обмежений, а вимоги до ефективності особливо високі. Практична цінність результатів полягає в тому, що розроблена модель може бути інтегрована в інтелектуальне ядро DSP-систем, які працюють на українському та міжнародних ринках, сприяючи підвищенню ефективності комерційних та соціально значущих інформаційних кампаній у воєнний та повоєнний періоди.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на інтеграції запропонованої архітектури з моделями прогнозування конверсії (Conversion Rate, CVR), побудові спільних моделей CTR × CVR для оптимізації наскрізного доходу, а також на розробці онлайнових та безперервних підходів до навчання, що дозволять оперативно адаптувати модель до змін поведінки користувачів в умовах затяжних кризових ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Guan F., Zhan J., Yang J. Accurate and interpretable CTR prediction via distilled neural additive feature interaction network // Journal of Big Data. – 2025. – Vol. 12, № 223. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-025-01281-9

2. Juan Y., Zhuang Y., Chin W. S., Lin C. J. Field-aware factorization machines for CTR prediction // Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems. – 2016. – P. 43–50. DOI: https://doi.org/10.1145/2959100.2959134

3. Zhu J., Liu J., Yang S., Zhang Q., He X. Open benchmarking for click through rate prediction // Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. – 2021. – P. 2759–2769. DOI: https://doi.org/10.1145/3459637.3482486

4. Cheng H. T. et al. Wide & deep learning for recommender systems // Proceedings of the 1st workshop on deep learning for recommender systems. – 2016. – P. 7–10. DOI: https://doi.org/10.1145/2988450.2988454

5. Guo H. et al. DeepFM: a factorization-machine based neural network for CTR prediction // IJCAI. – 2017. – Vol. 10. – P. 1725–1731. DOI: https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/239

6. Wang R. et al. Deep & cross network for ad click predictions // ADKDD'17. – 2017. DOI: https://doi.org/10.1145/3124749.3124754

7. Wang X. A survey of online advertising click-through rate prediction models // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence. – 2020. – P. 516–521. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIBA50161.2020.9277337

8. Busch O. Programmatic Advertising: The Successful Transformation to Automated, Data-Driven Marketing in Real-Time. – Springer, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25023-6

9. Wang K. et al. A Universal Framework for Compressing Embeddings in CTR Prediction // arXiv preprint. – 2024.

Секція 12. **БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА**

SAFEPILOT PRO WITH AI SUPPORT FOR MARITIME NAVIGATION SAFETY

Veselovskyi B.M., PhD Student
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: *A modern navigation system SafePilot Pro is described, which assists pilots during navigation in narrow channels, rivers, and ports. The system uses satellite signals, inertial sensors, and software to determine the ship's position with high precision. A promising direction of development is the implementation of AI technologies that enable risk prediction, anomaly detection, and improved efficiency of ship control.*

Keywords: *SafePilot Pro, maritime navigation, artificial intelligence, satellite technologies, navigation safety.*

СИСТЕМА SAFEPILOT PRO З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Веселовський Б.М., аспірант
Національний університет "Одеська морська академія", Україна

Анотація: *Розглянуто сучасну навігаційну систему SafePilot Pro, яка забезпечує підтримку лоцманів під час судноводіння у вузьких каналах, річках та портах. Система використовує супутникові сигнали, інерційні сенсори та програмне забезпечення для точного визначення положення судна. Перспективним напрямом розвитку є впровадження технологій штучного інтелекту, які дозволяють прогнозувати ризики, виявляти аномальні ситуації та підвищувати ефективність управління судном.*

Ключові слова: *SafePilot Pro, суднова навігація, штучний інтелект, супутникові технології, безпека судноплавства.*

Navigating large vessels in confined waters – such as busy ports, narrow river channels or locks – poses significant challenges. Limited manoeuvring space, high traffic density, variable currents and tides, shifting visibility – all these raise the risk of accidents, delays, and added costs. In this context, pilots require extremely accurate real-time awareness of the vessel's position, movement, heading, and of surrounding traffic and environment.

The SafePilot Pro system from Trelleborg addresses these challenges by providing a highly accurate, integrated portable pilot unit and software ecosystem. The system combines satellite positioning (GNSS), motion sensors (gyros, accelerometers, rate of turn sensors), and smart software to deliver precise real-time information about the ship's position, speed, heading and surrounding environment.According to Trelleborg, SafePilot Pro software integrates multiple information sources including vessel movement data, charts, weather forecasts, AIS and tug positions, and filters them intelligently so that pilots are presented only relevant information.

The result: enhanced situational awareness, improved decision making, and safer, more efficient manoeuvres.

HIGH ACCURACY: Let's look at how SafePilot Pro achieves high accuracy:

Multi-GNSS L1/L2 positioning enables satellite correction and high precision.

Real-time kinematic (RTK) corrections via NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) enable centimetre-level positioning accuracy.

Speed accuracy down to 1 cm/s, heading accuracy down to 0.01 degree in some model variants. Independent heading measurements (not relying solely on ship's instrumentation) and built-in rate gyro to provide a reliable rate of turn measurement for manoeuvring.

These features make the system especially suitable for confined waters, where even small positional errors can lead to large risks.

AI SUPPORT – FUTURE POTENTIAL: While the current SafePilot Pro system is already highly capable, there is strong potential for AI enhancements.

For example:

AI could analyse real-time data streams such as position, heading, speed, sensor health, external traffic, and detect anomalous movement patterns – for example, unusual drift, unexpected rate of turn, or sensor error.

AI could predict risks – such as a ship's projected track intersecting with another traffic stream, or a manoeuvre where under-keel clearance becomes critical.

AI could assist decision-making by recommending optimal manoeuvre timing, speed adjustments, or tug-assistance based on historical manoeuvre data and live sensor/traffic inputs.

Incorporating such AI modules would move the system from being a high-accuracy information platform to a smart assistant for the pilot – helping make decisions more quickly and with greater confidence.

REAL BENEFITS – SAFETY, EFFICIENCY, COLLABORATION: The deployment of SafePilot Pro offers several real practical benefits:

1. Safety improvement: With centimetre-level positional accuracy, improved heading and rate of turn information, pilots can manoeuvre large vessels in constrained waters with greater precision and less risk of collision, grounding or tug mishap.

2. Reduced delays: Better situational awareness and accurate guidance reduce time spent in approach, lock clearance, docking and undocking phases – thus reducing waiting times, tug usage, and berth occupancy.

3. Better collaboration: SafePilot Pro supports shared situational awareness among the pilot, tug crews, port authority, and bridge team. The filtered, relevant data helps avoid information overload and enhances communication.

However, for best performance several pre-conditions must be met:

1. The sensors and GNSS system must be properly installed and calibrated.

2. The signal environment must be stable (minimal interference, reliable RTK corrections).

3. Pilots and operators must be trained to use the system's functionality and interpret the data correctly.

CASE EXAMPLE: A recent example: Trelleborg has completed delivery of SafePilot systems to 25 major Mexican ports, standardising navigation across a national ecosystem of port operations. This illustrates how the technology is already being adopted at scale to improve safety and consistency.

The result: improved reliability, reduced maintenance/training burden, and national scale-operational enhancement.

SUMMARY: SafePilot Pro combines satellite positioning, high-accuracy sensors and smart software for real-time, centimetre-level positional awareness in ports, rivers and narrow channels.The system provides clear situational awareness to pilots, enabling safer and more efficient manoeuvres.Looking ahead, the addition of AI moduls could further enhance safety by predicting risks, detecting anomalies and supporting rapid decision making.The adoption of these systems is growing, and they represent a valuable part of the move toward smarter, safer and more efficient maritime operations.For modern ports and waterways coping with larger vessels, tighter schedules and complex traffic, tools like SafePilot Pro are becoming indispensable.

REFERENCES

1. Trelleborg Marine and Infrastructure. SafePilot Pro – Portable Pilot Unit for Maritime Navigation. Website: www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/ (Accessed: November 2025).

2. International Maritime Organization (IMO). E-Navigation Strategy Implementation Plan. London: IMO, 2019.

3. A Review of Artificial Intelligence-Based Optimization Applications in Traditional Active Maritime Collision Avoidance: Zhang Y., Zhang D., Jiang H. Sustainability, 2023.

4. Improving decision transparency in autonomous maritime collision avoidance: Madsen A.N., Brandsaeter A., van de Merwe K., Park J. Journal of Marine Science & Technology, 2025.

5. Artificial Intelligence in Maritime – a learning curve: Lloyd's Register (LR) & Thetius, 2022.

СТРАТЕГІЯ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Омельченко Т.Ю., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-1130-2883
Сандлер А.К., к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-0709-0542
Катеринич І.О., здобувач вищої освіти бакалаврського рівня
Національний університет "Одеська морська академія

Анотація. *Забезпечення безпечної експлуатації суден є основним завданням при здійсненні судноплавства у Світовому океані. Сучасні концепції навігації не достатньо досконалі й мають веоликий резерв щодо вдосконалення. Це пов`язано з тим, що зіткнення суден у морі, як і раніше, є основною проблемою мореплавства протягом багатьох років. Тому встає питання про впровадження інноваційних інженерно-технічних рішень, що дозволяють забезпечити додаткову вірогідність безпечного розходження суден.*

Ключові слова: *навігація, судно,розходження, лазер.*

STRATEGY AND TECHNICAL MEANS FOR IMPROVING SHIPPING SAFETY

Omelchenko T., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-1130-2883
Sandler A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0002-0709-0542
Katerynych I., applicant for a Bachelor's Degree
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract. *Ensuring the safe operation of vessels is the main task in the implementation of navigation in the World Ocean. Modern concepts of navigation are not perfect enough and have a significant reserve for improvement. This is due to the fact that the collision of vessels at sea, as before, has been the main problem of navigation for many years. Therefore, the question arises of implementing innovative engineering solutions that allow providing additional probability of safe separation of vessels.*

Keywords: *navigation, vessel, separation, laser.*

Сучасні умови, у яких проходять зустрічі суден у Світовому океані, перетерпіли значні зміни. Нинішня ситуація характеризується збільшенням щільності й інтенсивності морського руху, а також зростанням розмірів суден. Ці фактори, у свою чергу, негативно впливають на маневреність суден і приводять до зменшення чисельності екіпажів, відповідальних за безпечне керування суднами. Усі ці аспекти в сукупності приводять до зниження рівня безпеки при розходженні суден у море. Збільшення інтенсивності судноплавства може мати серйозні наслідки, особливо коли мова йде про зіткнення військових кораблів або про зіткнення між військовими й цивільними судами. Дана ситуація стає особливо небезпечної, якщо в зіткнення залучені атомні підводні човни або надводні кораблі, на борті яких перебувають ядерні установки або атомна зброя.

Такі інциденти можуть не тільки привести до трагічних наслідків, але й викликати екологічні катастрофи, наприклад, через розлив нафти в море (рис.1).

Саме тому в цей час надто важливо розробити й впровадити заходи, які радикально змінять підхід до запобігання зіткнень на воді. Керування морськими об'єктами має свої особливості, що відрізняють його від керування іншими видами транспорту. У випадках, коли судна наближаються один до іншого, з небезпечної для зіткнення дистанцією, часто виникає високий ступінь невизначеності у виборі параметрів для розходження. Це створює складності не тільки для судна, яке згідно із правилами повинне звільнити дорогу, але й для того, яке зобов'язано це робити, але має право вибору маневру. Судно, яке повинне поступитися, зустрічається з необхідністю ухвалити рішення щодо того, як саме воно буде маневрувати: чи потрібно взагалі робити маневр, який вид маневру вибрати, а також у який час і на якій відстані почати його виконання. Проблема запобігання зіткнень

стає особливо актуальної з появою великих судів, маневрені можливості яких суттєво обмежені в порівнянні з меншими судами. Складність навігації судноплавних потоків на морських шляхах, особливо у вузьких протоках і поблизу великих портів, значно зросла.

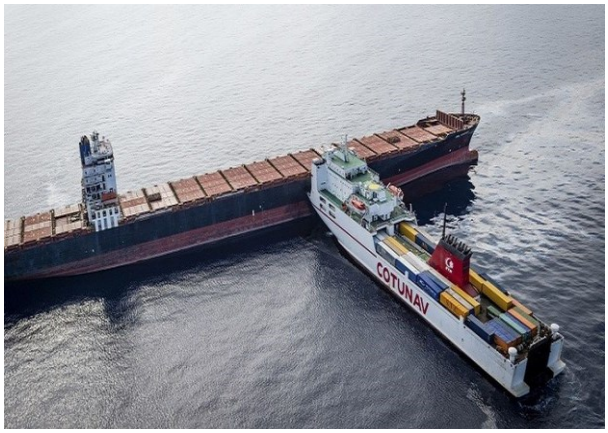


Рисунок 1 – Недбалість або недосконалість?

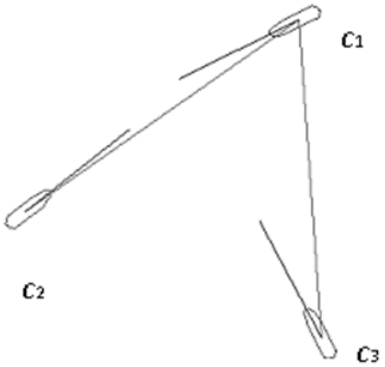


Рисунок 2 – Початкова навігаційна ситуація способу розходження суден: c_1 – судно, що оперує; c_2 – друге судно, яке наближається; c_3 – третє судно, яке наближається.

Погіршення умов для судноплавства, а також інші постійні фактори, такі як недостатнє технічне забезпечення судів, низький рівень організації судноплавства й неякісні міжнародні правила, що стосуються безпеки на морі, унеможливлюють зниження ймовірності зіткнень між суднами. Статистичні дані підтверджують, що рівень аварій у результаті зіткнень суден не знижується, незважаючи на всі зусилля, спрямовані на поліпшення безпеки на море. Це підкреслює необхідність комплексного підходу до рішення проблеми, який повинен містити в собі як технічні вдосконалення, так і організаційні заходи, спрямовані на підвищення кваліфікації екіпажів і поліпшення координації дій суден в умовах високої щільності морського руху. В остаточному підсумку, для забезпечення безпеки на морі необхідно не тільки додержуватися існуючим правил, але й постійно адаптувати їх до мінливих умов, а також впроваджувати нові технології й методи керування, які допоможуть мінімізувати ризик зіткнень і захистити як людські життя, так і морську екосистему [1 - 5].

Вихід з ситуації, що склалася, бачиться у оновленні стратегії розходження суден. Для пошуку шляхів вдосконалення проаналізовані найбільш поширені варіанти забезпечення розходження суден.

Стратегія розходження суден у процесі парних маневрів являє собою важливий аспект морського судноплавства, який вимагає ретельного планування й ґрунтується координації дій. Ця стратегія базується на принципі локально-незалежного керування, що має на увазі необхідність узгодження маневрів між судами, коли вони перебувають у небезпечному зближенні. Однак, незважаючи на свою популярність, дана стратегія має ряд недоліків, які можуть негативно позначитися на ефективності маневрів і безпеки суден.

Перший з недоліків полягає в тому, що кількість змін положення пера керма може бути надмірним. Це приводить до додаткового зношування кермового пристрою, що, у свою чергу, збільшує витрати на його обслуговування. Також необхідно враховувати, що для керування рухом судів потрібне значна кількість електроенергії, що спричиняє додаткові витрати на паливо для генерації цієї енергії.

Таким чином, недоліки даної стратегії не тільки стосуються безпеки, але й торкаються економічної складової. Другий недолік полягає в тому, що при керуванні процесом розходження за допомогою системи керування зникає необхідність у взаємному узгодженні маневрів. Це означає, що судна можуть діяти незалежно один від іншого, що не завжди приводить до оптимальних результатів. У таких випадках може виникнути ситуація, коли одне судно не враховує дії іншого, що може привести до небезпечних зближень і навіть зіткненням. Третій недолік полягає в тому, що при формуванні стратегії розходження, зближення не враховуються різні сценарії плину й процесу розходження суден. Це

обмежує можливості адаптації маневрів до реальних умов, що знижує загальну ефективність стратегії. У результаті, судна можуть виявитися у ситуації, коли вони не здатні адекватно реагувати на зміни обстановки.

Найближчою альтернативою до вищеописаної стратегії є підхід, який ґрунтується на зміні курсу судна для запобігання зіткнення. Однак і в цієї стратегії є свої недоліки. По-перше, кількість змін курсу також може бути надмірним, що веде до зношування кермового пристрою й збільшенню витрат на паливо. По-друге, як і в попередньому випадку, не враховуються різні варіанти плину процесу зближення й розбіжності судів, що також знижує ефективність маневрів.

Таким чином, актуальної є необхідність розробки нової стратегії розходження суден, яка буде враховувати безліч можливих сценаріїв розвитку подій і яка буде забезпечуватися інноваційними технічними засобами.

Основний вектор нової стратегії спрямований на реалізацію локально-незалежного керування з урахуванням різних варіантів зближення суден. Ця стратегія повинна відповідати вимогам системи бінарної координації й забезпечувати оптимальну величину зміни курсу судна.

Рішення поставленого завдання полягає у формуванні повної стратегії розходження судів, яка буде ґрунтуватися на зміні курсу. Важливою особливістю даної стратегії є те, що величина зміни курсу буде визначатися на основі інформації про курси інших суден у процесі зближення. Це дозволить ураховувати безліч факторів, що впливають на ситуацію, і заздалегідь формувати приватні маневри відхилення від інших суден. Таким чином, нова стратегія розходження суден дозволить значно підвищити безпеку та ефективність маневрів, мінімізуючи ризики зіткнень і знижуючи витрати на обслуговування суден. Суть теоретичної основи стратегії пояснюється кресленням (рис. 2), де зображено початкова навігаційна ситуація для формування способу розходження суден [6 - 9].

Спосіб розходження суден у випадку початкової ситуації зближення полягає у такому. Початкова навігаційна ситуація характеризується наступними змінними (приклад): параметрами руху, що оперує судна c_1 - K_1 = 244, V_1 = 20 вузлів; друге судно, яке наближується c_2 - K_2 = 52, V_2 =18 вузлів; третє судно, яке наближується c_3 - K_3 = 332, V_3 = 27 вузлів; відносна позиція α_{12} = 238, d_{12} = 5,0 миль, α_{13} =176, d_{13} = 4,76 милі, α_{23} =115, d_{23} = 5,0 миль. За вихідним даними були розраховані дистанції найкоротшого зближення суден: D_{min12} = 0,0 милі, D_{min13} = 0,0 милі, D_{min23} = 0,9 милі. Тому що всі три судна, що зближаються, є судами з механічним двигуном, то мають однаковий статус. Координатор з обліком їх відносного положення формує координуючі сигнали γ_{12} = 0, γ_{21} =1, γ_{13} = 0, γ_{31} =1, γ_{23} =1 і γ_{32} = 0.

У даному прикладі координуючі сигнали γ_{12} = 0 і γ_{13} = 0 є погодженими, отже, якщо суду c_2 і c_3 виконують запропоновані координатором маневри відхилення $D_2(1)$ і $D_3(1)$, то судно, що оперує, c_1 повинне зберігати незмінні параметри руху, реалізуючи стратегію $D(0)$. Коли хоча б одна із цілей не звільняє дорогу судну, що оперує, то воно випливає постійним курсом і швидкістю $D(0)$ до моменту часу, після чого власним маневром розходження $D(t)$ запобігає можливому зіткненню. У даному прикладі момент часу визначається зменшенням дистанцій d_{12} і d_{13} до значень d_{12} =3,4 милі й d_{13} = 2,9 милі. У цей момент часу судно, що оперує, c_1 реалізує приватну стратегію $D(t)$, яка полягає у відхиленні c_1 на курс K_{1y} = 286°, у результаті чого воно безпечно розходиться із суднами c_2 і c_3 на відстанях D_{min12} =1,7 милі й D_{min13} =1,0 милі.

Таким чином, узагальнюючи вищевикладене, у розглянутій початковій ситуації зближення спосіб розходження D_1 судна, що оперує, можна записати як:

$$D_1 = \begin{cases} D_1(0), \text{якщо } \gamma_{12}=0, \gamma_{13}=0, D_2(1), D_3(1) \\ D_1(0), \text{якщо } \gamma_{12}=0, \gamma_{13}=0, D_2(0), D_3(0), t \le \tilde{} \\ \tilde{1} \quad \tilde{} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \succ \end{cases}$$

Якщо дві перші частки способу не передбачають маневрування судна, що оперує, то реалізації приватної частки $\tilde{1}$ $\tilde{}$ вимагає спочатку відхилення судна c_1 із програмної

траєкторії руху, а після безпечної розбіжності, – його повернення до початкового режиму руху.

Таким чином, перевагою способу розходження судна, що оперує, є облік можливої зміни процесу зближення із цілями й попередньо сформовані приватні маневри відхилення, що передбачають різні результати мінливої ситуації зближення, безліч яких залежить від діючої системи бінарної координації [8].

З опису стратегії випливає, що вірогідна оцінка процесу зближення суден нерозривно пов'язана з ефективністю пристроїв визначення координат та елментів руху суден, а також розпізнавання форми віддалених об'єктів на морі. Тенденції розвитку вимірювальної техніки надають переконливі докази, що найефективніше для цього використовувати електромагнітні хвилі оптичного діапазону. Оптичне позиціювання має можливість визначати з високою точністю відстані до рухомих та нерухомих об'єктів. До суттєвих переваг оптико-електронного інструментарію ставиться також, висока здатність щодо визначення дальності та пеленгу, тобто здатність розрізняти два об'єкта, які близько розташовані. Сукупність властивостей дає можливість широкого застосування оптико-електронних систем у морської навігації.

В основі створення такого інструментарію лежить глибоке розуміння фізичних процесів виникнення, поширення оптичного випромінювання, а також теорії приймання й обробки оптичних сигналів з урахуванням особливостей їх просторово-тимчасової структури, хвильових і корпускулярних властивостей [10 -12].

За сукупністю властивостей, для рішення задач морської навігації, може бути в нагоді лазерний пристрій терагерцового діапазону. Лазер, розроблений у Стенфордському університеті, може розрізняти об'єкти крізь густий туман і хмари. Технологія може застосовувати не тільки в класичній навігації, але й в розвитку безпілотних суден, у якої головна проблема – це здатність роботизованих систем аналізувати навколишню ситуацію й розрізняти об'єкти навколо. Камери, ультразвукові датчики та Lidar-системи можуть помилятися в оцінці найближчих об'єктів і відстані до них, не говорячи вже про умови з обмеженою видимістю. Новий лазерний пристрій, який може розрізняти об'єкти навіть крізь шар густого туману, диму або хмар. В основі цього пристрою лежить "конфокальна дифузійна томографія", – метод дослідження об'єкта за допомогою виміру руху часток світла, вироблених імпульсами лазера, які відбиваються від об'єкта за перешкодою. Ці виміри виконує комп'ютерний алгоритм, який обробляє сигнал і відновлює форму об'єкта, схованого від безпосереднього спостереження. Під час експерименту пристрій підтвердив здатність розрізняти об'єкти, сховані за шаром піни, товщиною в один дюйм. Схожі технології використовувалися й раніше, але нова система вперше може працювати без даних про те, на якій відстані за перешкодою розташований об'єкт. Це дійсно розсовує межі того, що може бути можливим за допомогою будь-якої сенсорної системи [13].

Для поширення можливостей зазначеного лазера може застосовуватися, розроблене у Національному університеті "Одеська морська академія" адаптивне дзеркало корабельних оптико-локаційних станцій. Дзеркало складається з основи, яка містить концентричні прозорі кільця, ширина яких та відстані між ними послідовно змінюються у напрямку від краю до центра дзеркала. Послідовність зміни може бути плавною або плавно дискретною. Відмінність пропонованого дзеркала від існуючих аналогів полягає у тому, що кільця, які виконані з електрооптичного матеріалу та розділені шарами скла зі штучного сапфіру, згруповані в єдиний блок у межах основи та підключені до плати керування.

У розробленому дзеркалі відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений динамічний діапазон режимів роботи й одночасно можлива незалежна зміна оптичних властивостей різних поверхонь [14, 15].

У підсумку можна зазначити, що впровадження розробленої стратегії розходження суден може бути ефективним тільки на основі попереднього глибокого аналізу й експертній оцінці технічно реалізованих варіантів розв'язування задачі навігації за такими критеріями як: актуальність, наукова новизна та техніко-економічна доцільність.

За результатами виконаного аналізу й експертних оцінок найбільш оптимальним і доцільним слід прийняти варіант удосконалювання позиціювання суден на основі простих, надійних і універсальних схемотехнічних рішень волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів, які об'єднані у загальносуднову інформаційно-вимірювальну систему [16, 17].

ЛІТЕРАТУРА

1. Омельченко, Т. Ю. Проблемы логистики и пути их решения в Украине // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2011. – № 35. – С. 269 - 274.
2. Sotnychenko, L., Haichenia, O., Omelchenko, T., Kuzmenko, K. Assessment of Consistency in the Functioning of Seaports of Ukraine //Economics Ecology Socium. – 2024.– Т. 8. – № 1. – С. 78 - 8.
3. Бурмака, И. А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И. А Бурмака, Э. Н Пятаков, А. Ю. Булгаков. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 585 с.
4. Бурмака, И. А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бурмака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
5. Бурмака, І. А., Кулаков, М. О., Калініченко, Г. Є. Методи зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2 (17). – С. 4 - 13.
6. Пятаков,Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э. Н. Пятаков, Р. Ю. Бужбецкий, И. А. Бурмака, А.Ю. Булгаков. – Херсон: Гринь Д. С., 2015. – 312 с.
7. Пятаков,Э. Н.Формирование полной стратегии расхождения судов /Э. Н. Пятаков, Т. Ю. Омельченко//Автоматизация судовых технических средств. ОНМА, 2017.– № 23.– С.77 - 84.
8. Омельченко, Т. Ю. Удосконалення алгоритмів процесом розходження суден: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.13. – Одеса, 2018. – 257 с.
9. Омельченко, Т. Ю. Отображение траектории расхождения судна уклонением вправо в множество относительных траекторий / Т. Ю. Омельченко, Э. Н. Пятаков, Е. Е. Тюпиков // East European Science Journal. – 2017. – №11 (27). – part 1. – С. 58 - 69.
10. Сандлер, А. К., Шепель, В. В., Германчук, Д. О. Автоматизована система для здійснення океанографічних досліджень // XIII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 22.11.2023 - 23.11.2023 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУОМА. – 2023. – С. 201 - 207. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2023.11.1-248
11. Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю. Вдосконалення обладнання для протидії загрозам безпеці судноплавства // Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 19.11.2024 - 20.11.2024. – Одеса: НУОМА, 2024. – С. 225 -229. DOI: http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2024.19.11.24.pdf.
12. Сандлер, А. К., Шепель, В. В. Автоматизований пристрій для визначення відстаней та розпізнавання форми віддалених об'єктів // Судноводіння. – 2024. – Вип. 36. – Одеса: НУОМА. – С. 163 - 170. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.163-170.
13. https://gazeta.ua/ru/articles/edu-and-science/_uchenye-razrabotali-lazer-kotoryj-vidit-skvoz-tuman/984407.
14. Сандлер А. К., Палагін, О. М. Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 102 – 112. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-104-113.
15. Сандлер, А. К., Омельченко, Т. Ю. Вдосконалення автоматизованих пристроїв налаштування навігаційної техніки // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers "ΛΌГОΣ" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. – 2024. – P. 227 - 232. DOI: 10.36074/logos-29.03.2024.052.
16. Заічко, С. І., Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Схемотехнічне рішення азимутального датчику вітру // Судовождение. – 2015. – Вып. 26. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 93 - 98.
17. Будашко, В. В., Нікольський, В. В., Хнюнін, С. Г., Сандлер, А. К. Застосування вентильованого гвинта в азимутальної гвинто-рульової колонки на низьких швидкостях // XII міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 21.11.2022 - 23.11.2022 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2022. – С. 150 - 154. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203.

Секція 13. **ПЕДАГОГІКА ТА ОСВІТА**

ЧИ КРОКУЄ ПРОХОДЖЕННЯ МОРСЬКОЇ ПРАКТИКИ В НОГУ З СУЧАСНИМИ МОДЕЛЯМИ НАВЧАННЯ МОРЯКІВ?

Дрозд О.В., доцент
Національний університет "Одеська морська академія"

Анотація. *Актуалізованосучасну проблему практичної підготовки майбутніх фахівців водного транспорту. Проаналізовано наукові дослідження з проблематики практичної підготовки студентів закладів вищої морської освіти. На основі аналізу зроблено висновок про те, що аспекти оновлення організації практичної підготовки майбутніх фахівців морського та річкового транспорту мають певні резерви. Визначено, що для цього курсанти мають навчитися під час практичної підготовки: отримувати вхідну інформацію щодо характеру професійної ситуації та причин її виникнення; обробляти цю інформацію; використовувати результати рішення. У результаті курсанти оволодіють знаннями щодо правильного вибору способів вирішення конкретних професійних завдань, застосування доцільних способів їх вирішення, удосконалення наявних способів вирішення професійних ситуацій і визначення вимог до розробки нових сучасних способів вирішення професійних завдань у морській галузі.*

Ключові слова: *морські фахівці, підготовка фахівців, практична підготовка, інформація*

IS MARITIME PRACTICE IN LINE WITH MODERN MODELS OF TRAINING FOR SEAMEN?

Drozd Olena, associate professor
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract. *The current problem of practical training of future specialists in water transport is updated. Scientific research on the issues of practical training of students of higher maritime education institutions is analyzed. Based on the analysis, it is concluded that aspects of updating the organization of practical training of future specialists in sea and river transport have certain reserves. It is determined that for this, cadets must learn during practical training: to receive input information about the nature of the professional situation and the reasons for its occurrence; to process this information; to use the results of the solution. As a result, cadets will acquire knowledge about the correct choice of methods for solving specific professional tasks, the application of appropriate methods for solving them, the improvement of existing methods for solving professional situations and the definition of requirements for the development of new modern methods for solving professional tasks in the maritime industry.*

Keywords: *maritime specialists, training of specialists, practical training, information*

Ефективність систем управління безпекою у морській індустрії значною мірою залежить від людського фактору та рівня професійної підготовки персоналу, що безпосередньо впливає на показники аварійності та економічну ефективність експлуатації суден. Згідно з дослідженнями, більше 80% морських інцидентів обумовлено різними формами людської помилки. Висока якість професійної освіти розглядається як запорука того, що спеціаліст матиме необхідний рівень знань, навичок та компетенцій для виконання своїх професійних завдань. Нестача кваліфікованих фахівців на ринку морської праці прискорює кар'єрне зростання фахівців, що, своєю чергою, скорочує період набуття курсантами необхідного практичного досвіду. У звіті за 2021 рік, опублікованому Балтійською та Міжнародною морською радою (BIMCO) разом із Міжнародною палатою судноплавства (ICS), прогнозується подальше розширення світового торговельного флоту та підтримання високого попиту на спеціалістів морської галузі. Очікується, що до 2026 року буде потрібно майже 18 тисяч додаткових морських офіцерів щороку. Професійна підготовка моряків має вирішальне значення, оскільки саме її якість визначає ефективність функціону-

вання морської галузі, а також рівень безпеки судноплавства, захисту людських життів, дотримання екологічних стандартів та стабільність світової транспортної системи. Оскільки близько 90% міжнародної торгівлі здійснюється морським транспортом, стандартам навчання моряків приділяється особлива увага. Ці стандарти забезпечуються положеннями Міжнародної конвенції про підготовку, дипломування та несення вахти моряків, ухваленої у 1978 році разом із наступними поправками.

Статистичний аналіз аварійності показує, що понад 40% таких ситуацій виникають через недостатній рівень підготовки та відсутність практичних навичок. У відповідь на ці виклики Міжнародна морська організація (IMO) заснувала Підкомітет з питань людського фактору, який займається удосконаленням освіти та підготовки моряків. Забезпечення якісної морської освіти разом із впровадженням сучасних навчальних методик має ключове значення для сталого розвитку галузі.

Складність технологічних процесів у сфері морського транспорту вимагає ширшого використання практичної підготовки у навчальному процесі. Це дає змогу не лише зміцнити практичні навички студентів, але й адаптувати їх до сучасних вимог галузі [1 - 4].

Отже, як досліджено у [5 - 7], вплив практичної підготовки на рівень сформованості готовності майбутніх морських офіцерів до професійної діяльності, який базується на підході, де кожен компонент готовності представлений декількома рівнями прояву: перший, другий і третій.

Перший рівень (репродуктивний) передбачає мінімальний набір знань, умінь і навичок, професійних мотивів, ціннісних орієнтацій та необхідних якостей. Такий фахівець здатен виконувати професійні обов'язки, покладаючись або на зовнішні підказки, або самостійно. Виконання завдань на цьому рівні можливе в стандартних умовах, схожих до навчальних ситуацій, які прямо передбачені у засвоєному матеріалі.

Таким чином, характеристика першого рівня зводиться до здатності відтворення інформації і застосування вивченого способу дій у типовій ситуації.

Другий рівень (продуктивний) передбачає вищий ступінь готовності. Тут фахівець уже не лише відтворює інформаційне надбання, а й творчо його трансформує для досягнення нових результатів.

Використовуючи засвоєні раніше механізми виконання завдань, він здатен адаптувати їх у ситуаціях, близьких до стандартних. Продуктивний рівень вимагає активного перетворення отриманої інформації і є основою для створення нового продукту чи інформації.

Третій рівень (творчий) є найвищим етапом готовності і характеризується здатністю діяти в нестандартних умовах. Фахівець із таким рівнем демонструє гнучкість мислення, здатність вирішувати нестандартні завдання, а також прагнення до саморозвитку, ґрунтуючись на раніше отриманій інформації. Він проявляє самостійність у пошуку нових знань, визначає проблему, формулює та перевіряє гіпотези. Використання креативних підходів у практичній діяльності є показником цього рівня. До того ж майбутній фахівець прогнозує події та результати, аналізує ситуації і пропонує нові підходи до виконання завдань. Творчий рівень включає здатність об'єктивно оцінювати власні можливості, узагальнювати проблемні ситуації та проектувати інноваційні рішення. Майбутній фахівець може створювати і впроваджувати нові способи діяльності навіть у зовсім нетипових умовах, що є вершиною його професійної підготовки.

Що об`єднує усі рівні? Загальним для них є опанування, інтерпретація та застосування отриманої інформації. І найбільш раціональним і доцільним, у сенсі, може бути імплементація новітніх інформаційних технологій у процес практичної підготовки.

В умовах суттєво впливу опанування візуальною інформацією, тренажерна підготовка є ключовим елементом формування професійних компетенцій майбутніх фахівців, адже вона забезпечує максимально близьке до реальних умов судноплавства навчання. Використання тренажерів із тривимірними симуляційними технологіями значно підви-

щило якість відпрацювання практичних навичок, водночас усуваючи ризики для життя та здоров'я. Ці досягнення зумовили зміни в організації освітнього процесу у вищих морських навчальних закладах, сприяючи переорієнтації навчальних технологій на формування умінь працювати в умовах цифрового світу.

Одним із перспективних напрямів розвитку стала інтеграція електронного навчання, яке базується на використанні віртуальних графічних середовищ, доповненої реальності, комп'ютерних симуляцій, а також віртуальних 3D-світів із ефектом повного занурення. Технології візуалізації, такі як 3D-принтери, візуалізація інформації, доповнена та віртуальна реальності, аналіз візуальних даних, об'ємне й голографічне відтворення, сприяють ефективному сприйняттю інформації. Вони ґрунтуються на здатності мозку швидко обробляти візуальні образи, знаходити зв'язки та впорядковувати складні ситуації інтуїтивним шляхом [8].

У суднобудуванні та машинобудуванні застосування інтегрованих засобів, які вже зарекомендували себе в аерокосмічному та автомобільному секторах, стало звичною практикою. Серед таких засобів можна виділити моделювання поверхонь, фотореалістичну візуалізацію пристроїв та процесів, інженерний аналіз та інші методи.

У сучасних умовах особлива увага приділяється функціонуванню системи "курсант-віртуальна інформація" у практичній підготовці. Ця проблема має двосторонній характер: важливо як уміння курсантів орієнтуватися у великому обсязі інформації, так і якість використання цієї інформації під час навчання фахівців.

Комп'ютерне моделювання, що має величезний потенціал і універсальність, дозволить організувати багаторівневу систему його застосування. Перспективною є градація рівнів використання методів віртуальної реальності у підготовці фахівців.

Первинний рівень передбачає роботу з тривимірними комп'ютерними моделями конструкцій суден, енергетичних установок та суднових систем. На цьому етапі відбувається формування базових знань та навичок, необхідних для впевненого функціонування фахівця у середовищі "інформація в полі користувача", де інформація постає як продукт професійної діяльності. Базовий рівень застосування комп'ютерного моделювання розширює можливості шляхом використання статичних і динамічних тривимірних моделей, що є частиною методичного забезпечення практичної підготовки. Завдання цього рівня поділяються на кілька підрівнів. Підрівень "Бакалавр" орієнтований застосування моделей для спрощення сприйняття геометрично складних форм, конструкцій і схем. Тривимірні статичні та динамічні моделі, що використовуються, відрізняються високим ступенем інформативності і оборотності (рис. 1).

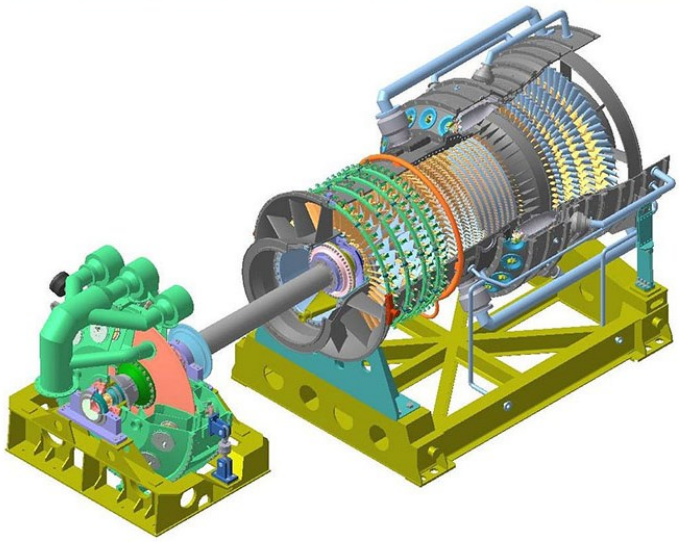


Рисунок 1 – Тривимірна модель газотурбінної установки

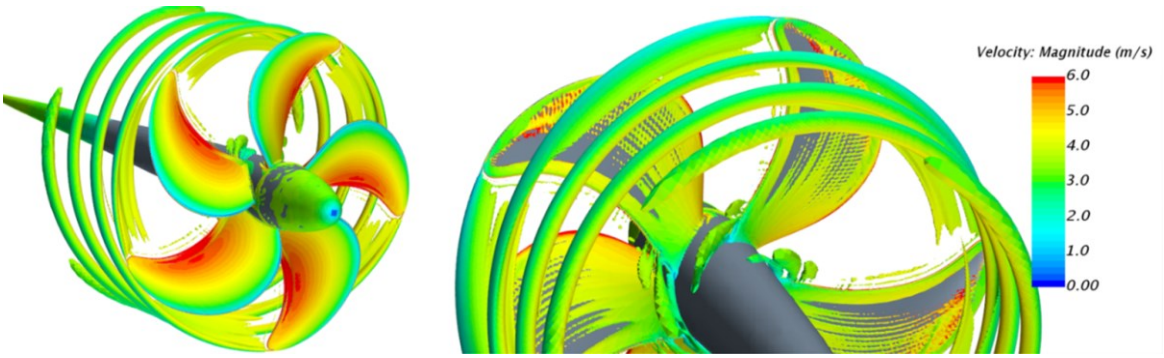


Рисунок 2 – Візуалізація процесу роботи гребного гвинта

Крім того, функція редагування поверхонь та твердотільних фігур дозволяє моделювати етапи теплоенергетичних процесів суднових енергетичних установок або технологічні операції судноремонту. Комп'ютерний аналіз у разі служить як візуалізації завдань, але й допомагає знаходити оптимальні шляхи їх вирішення.

Особливою перевагою завдань підрівня "Бакалавр" є низька матеріальна та тимчасова витрата на застосування комп'ютерних моделей, що сприяє активному впровадженню цього методу у процес практичної підготовки.

Підрівень "Магістр" включає завдання, спрямовані на "віртуальне занурення", тобто взаємодію курсанта з симулятором суднової енергетичної установки або всього судна (рис. 3).

Рисунок 3 – Віртуальна модель, яка застосовується для судноремонтних робіт

Динамічні тривимірні моделі, що лежать в основі даних симуляторів, мають найважливіші властивості для підготовки морських інженерів, включаючи дослідження процесів у реальному часі та можливість управління віртуальним простором. Відпрацювання ситуативних завдань на таких симуляторах сприяє не лише здобуттю необхідних знань та навичок курсантами. Аналіз отриманих результатів з точки зору безпеки, ергономіки та статистики також дозволяє розробляти ефективніші методики дій персоналу в штатних та аварійних ситуаціях, а також взаємодіяти з проектувальниками суднового обладнання та суднобудівниками.

Таким чином, результатом базового рівня підготовки має стати ефективна інтеграція системи "користувач у полі інформації", що забезпечує якісне навчання фахівців та їхню взаємодію з віртуальним середовищем [9]. Це буде сприяти ефективному формуванню як професійних компетентностей, так і особистісних якостей майбутніх фахівців, максимально наближених до умов їхньої майбутньої роботи. Технології змішаної реальності можна розглядати як потужний інструмент для розвитку професійного мислення на високому рівні мотивації у майбутніх морських спеціалістів. Завдяки моделюванню професійних ситуацій забезпечується можливість здобуття практичних навичок без ризику для життя людей, організації командного навчання, а також відпрацювання дій у надзвичайних ситуаціях на морі без загрози для життя чи технічного обладнання [10]. Симуляційне навчання сприяє формуванню високого рівня професійної навігаційної компетентності та дозволяє об'єктивно оцінити результати навчального процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mykhaylo V. Miyusov, Liudmyla L. Nikolaieva, Vitaliy V. Smolets. The Effectiveness of Immersive Learning in Maritime Education and Training.
URL: https://www.toms.com.hr/index.php/toms/article/view/521

2. Mykhaylo V. Miyusov. & Vadym, M. Zaharchenko (2018). Seafarers Education, Training and Crewing in Ukraine, Proc. 19th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU), Barcelona, Spain, October 17-19, pp. 173-180. URL: https://bib.irb.hr/datoteka/962247.Ebook_IAMU_2018.pdf.

3. Eurydice (2021). Draft Law on the Organization and Integration of Vocational Training. URL: https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/national-reforms-vocational-education-and-training-and-adult-learning-70_en.

4. Muratore, M., Tuena, C., Pedroli, E., Cipresso P. & Riva, G. (2019). VR as a Possible Tool for the Assessment of Self-Awareness, Frontiers in Behavioral Neuroscince.
URL: https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00062.

5. Даниленко, О. Б. Неперервна професійна підготовка майбутніх судноводіїв у вищих морських навчальних закладах: теорія і практика: монографія. –: Запоріжжя: АА Тандем, 2020. – 564 с.

6. Волошинов, С. А. Організація практичної підготовки майбутніх фахівців морського та річкового транспорту.
URL: https://rep.ksma.ks.ua/jspui/bitstream/123456789/126/3/Voloshynov_ practical %20_ training.pdf

7. Герганов, Л. Д. Тренажерно-практична підготовка студентів та фахівців плавскладу в морських навчальних закладах України як інструмент безпеки судноплавства // Водний транспорт. – 2013. – № 1. – С. 114 - 118.

8. Попова, Г. В. Симуляційні технології змішаної реальності у підготовці майбутніх судноводіїв // Науковий огляд. – 2019. – № 6(59). – С. 103 - 110

9. Сандлер, А. К. Совершенствование информационного обеспечения эксплуатации энергетических установок // Нові технології навчання у вищій технічній освіті: досвід, проблеми, перспективи. – Київ: НУХТ. – 2004. – С. 54 - 56.

10. Sellberg, C. (2017). Training to become a master mariner in a simulator-based environment: The instructors' contributions to professional learning. Göteborgs universitet. Utbildningsvetenskapliga fakulteten University of Gothenburg. Faculty of Education. URL: http://hdl.handle.net/2077/54327 .

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОПИС

Будашко В.В. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ СУДНОВИХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ / *Будашко В.В.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.8-15

Mezhuyev V. INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS AND NEXT-GENERATION MARITIME VESSEL NAVIGATION AUTOMATION / *Mezhuyev V.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.16

Petryshyn Lubomyr THE IMPORTANCE OF TRAINING MARITIME PROFESSIONALS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO ENHANCE NAVIGATION SAFETY AND OPERATIONAL EFFICIENCY /*Petryshyn L.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.17

Будашко В.В. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМ КОМПЛЕКСОМ ОФШОРНОГО СУДНА НА ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ / *Будашко В.В., Сочинський Д. Р.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.18-24

Шевченко В. А. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ ПАЛИВНИХ ВИТРАТ / *Шевченко В. А., Очеретяний Ю.О., Романов А.М., Мунтян О.М., Табулінський І.М.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.25-34

Рябцов О.В. ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ БІМОРФНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ СУДНОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ / *Рябцов О.В.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.35-37

Гвоздева І.М. ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬ - ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ / *Гвоздева І.М. , Миргород В.Ф., Шевченко В.А., Чуйко Я.І., Крицький В.І.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.38-42

Борса Є.В. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ / *Борса Є. В., Будашко В. В.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.43-51

*Найденко О.В. Н*АДІЙНІСТЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У СИСТЕМІ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ ТА ВИМОГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ /*Найденко О.В., Берсеньова Н.М.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.52-54

Михайленко В.С. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ АГРЕГАТІВ СЕУ В ПРОЦЕСАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ / Михайленко В.С., Лещенко В.В., Грама Г.П.// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.55-57

Муха М.Й. МОДЕРНІЗАЦІЯ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЇ СИСТЕМИ З ТЕХНОЛОГІЄЮ ШІМ / *Муха М.Й., Дранкова А.О., Звєрьков Д.О.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.58-66

Дубовик В.О. ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДІЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУДНОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ / *Дубовик В.О., Самонов С,Ф., Кульбацький А.В., Дудко С.А.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.67-70

Опришко М. О. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛКОННОЇ ОПТИКИ, ЯКА ІНТЕГРОВАНА У КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ /*Опришко М. О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.68-76

Шестака А.І. GaN і SiC: НОВІ МАТЕРІАЛИ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ / *Шестака А.І., Мельнікова Л.В.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.77-79

Попов В.Г. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ В ТІЛАХ, ЩО МІСТЯТЬ ТОНКІ ЖОРСТКІ ВКЛЮЧЕННЯ / *Попов В.Г., Кирилова О.І.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.80-83

*Пташенко Ф.О.*КІНЕЧНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ В ДІАПАЗОНІ УЛЬТРАВИСОКИХ ЧАСТОТ/ *Пташенко Ф.О., Поповський О.Ю., Горюк А.А., Зенченко В.П.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.84-87

Налева Г. В. СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ШВИДКОДІЮЧОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ПЛАВАЛЬНОГО АПАРАТА / *Налева Г. В., Мазур О. М., Онищенко О. А.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.88-91

Кривий О.Ф. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІЖФАЗНИХ ЖОРСТКИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ З КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ / *Кривий О.Ф., Морозов Ю.О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.92-95

Shpinareva I.M. A SURVEY OF WPA2 WEAKNESSES: PIXIE DUST, PMKID EXTRACTION AND KEY REINSTALLATION ATTACKS / *Shpinareva I.M., Strashnov V.V.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.96-99

Шишкін О.В. СКАСУВАННЯ НЕНАВМИСНОГО ЦИФРОВОГО СЕЛЕКТИВНОГО ВИКЛИКУ ЛИХА У ГМЗЛБ / *Шишкін О.В., Пашенко О.Л.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.100-103

Купровський В.І. ЦИФРОВА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ NAVDAT ЯК ЕЛЕМЕНТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГМЗЛБ /*Купровський В.І.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.104 -108

Шишкін О.В. ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУДНОВИХ ПРИЙМАЧІВ ГНСС / *Шишкін О.В., Коновець В.І., Пашенко О.Л., Харченко Р.Ю.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.109-113

Пашенко О.Л. ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ СПОВІЩЕНЬ (Return Link Service) В АВАРІЙНИХ РАДІОБУЯХ (EPIRB) / *Пашенко О.Л.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.114-116

Борса Є.В. ОГЛЯД ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН / *Борса Є.В., Михайлов С.А.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.117-121

Михайлов С.А. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІБЕРСТІЙКОСТІ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АВТОНОМНИХ СУДЕН / *Михайлов С.А., Чуйко Я.І.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.122-125

Михайлов С.А. МЕТОДОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КІБЕРБЕЗПЕКІ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СУДЕН / *Михайлов С.А., Крицький В.І.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.126-130

Levinskyi M.V. IMPROVING NETWORK TRAFFIC IN BANDWIDTH-RESTRICTED MILITARY INFRASTRUCTURES USING PI-HOLE / *Levinskyi M.V., Levinskyi V.M., Volovshchykov V.Yu.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.131-133

Бушер В.В. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ / *Бушер В.В.,Захарченко В.М., Кравченко В.В.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.134-136

Яровенко В.О. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ ЕЛЕКТРОХОДІВ ПРИ МАНЕВРУВАННІ /*Яровенко В.О., Шумило О.М.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.137-140

Ткаленко О.С. СИНТЕЗ НЕЙРО-ПІД РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ПОТУЖНОГО ДВИГУНА В МЕХАНІЗМІ З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ /*Ткаленко О.С.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.141-144

Романець А.О. КОМПЕНСАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ ЗАВАД І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ / *Романець А.О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.145-149

Харченко Р.Ю. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ / *Харченко Р.Ю., Кочетков О.В.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.150-153

Гвоздева І.М. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРУ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ТА ПРОБЛЕМИ РЕАЛІЗАЦІЇ / *Гвоздева І.М. , Миргород В.Ф., Грама Г.П., Кольцов Г.С.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.154-157

Палагін О.М. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ МАС У БАЛАСТНИХ ТАНКАХ НАПІВЗАГЛИБНИХ СУДЕН / *Палагін О.М., Сандлер А.К., Глазєва О.В.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.158-164

Михайленко В.С. ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У МОРСЬКІЙ ГАЛУЗІ / Михайленко В.С., Гунченко Ю.О., Лещенко В.В.// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.165-167

Сандлер А.К. ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ / *Сандлер А.К., Глазєва О.В., Тимчинський Н.І.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.168-173

Сандлер А.К. ЗАСІБ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У СУДНОВОМУ СКРУБЕРІ /*Сандлер А.К., Удолатій В.Б.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.174-178

Разінкін Р.О. ОГЛЯД СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВТУЛОК ЦИЛІНДРІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ / *Разінкін Р.О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.179-183

Куропятник О.А. УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ДІОКСИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ / *Куропятник О.А.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.184-187

Удолатій В.Б. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ПОГЛИНАННІ ДІОКСИДУ СІРКИ У МОРСЬКИХ СКРУБЕРАХ / *Удолатій В.Б.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.188-193

Гунченко Ю.А. ДОСЛІДЖЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМАХ RTB / *Гунченко Ю.А., Мартинович Л.Я., Іванов О.О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.194-198

Veselovskyi B.M. SAFEPILOT PRO WITH AI SUPPORT FOR MARITIME NAVIGATION SAFETY / *Veselovskyi B.M.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.199-200

Омельченко Т. Ю. СТРАТЕГІЯ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА /*Омельченко Т. Ю., Сандлер А.К., Катеринич І.О.*// Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.201-205

Дрозд О.В. ЧИ КРОКУЄ ПРОХОДЖЕННЯ МОРСЬКОЇ ПРАКТИКИ В НОГУ З СУЧАСНИМИ МОДЕЛІМИ НАВЧАННЯ МОРЯКІВ / *Дрозд О.В.* // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.206-210

Наукове видання

М А Т Е Р І А Л И

XV Міжнародної науково-технічної конференції

"СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА"

26.11.2025

Комп'ютерна верстка: *О.В. Глазєва*

Підписано до друку 30.12.2025
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Ум. друк. арк. 12,56
Тираж 300 пр. Замовлення № И25-01-10

НУ «ОМА», центр «Видавінформ»
65052, м. Одеса, Дідріхсона, 8, корп. 7
Свідоцтво ДК № 1292 від 20.03.2003
e-mail: publish@onma.edu.ua
Телефони: +38 (048) 793-24-50
+38 (048) 793-24-51