

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 3(22), 2024

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

**ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

№ 3(22)
2024

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1547 від 09.05.2024 року

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
у галузі економічних та технічних наук (051 – Економіка, 073 – Менеджмент,
133 – Галузеве машинобудування, 271 – Морський та внутрішній водний транспорт,
275 – Транспортні технології (за видами)).

Засновник:

Одеський національний морський університет
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

Редакційна колегія:

Головний редактор – д.т.н., проф. *Руденко С.В.*
Заступник головного редактора – д.е.н., проф. *Савельєва І.В.*
Відповідальний секретар – д.т.н., доц. *Мінчев Д.С.*

Члени редакційної колегії:

Варбанець Р.А., д.т.н., проф., ОНМУ;
Дубровський М.П., д.т.н., проф., ОНМУ;
Єгутов К.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Постан М.Я., д.е.н., проф., ОНМУ;
Кириллова О.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Ланкіна І.О., д.е.н., проф., ОНМУ;
Пітерська В.М., д.т.н., проф., ОНМУ;
Малаксіано М.О., д.т.н., проф., ОНМУ;
Немчук О.О., к.т.н., доц., ОНМУ;
Мельников С.В., к.е.н., доц., ОНМУ;
Філіна-Давидович Л.С., д.т.н., Західноморський технологічний університет, Щецин, Польща;
Аймелек Мурат, PhD, Ізмірський університет імені Катіпа Челебі, Туреччина;
Малекі Вішкіаї Бехзад, PhD, Вільний міжнародний університет соціальних досліджень імені Гвідо Карлі, Італія;
Колмикова Анна, DSc, Бременський університет, Німеччина;
Любомиров Славі Ясенов, PhD, Пловдивський університет імені Паїсія Глендарського, Болгарія;

Духовник Йосе, DSc, Люблянський університет, Словенія;
Гасанов В., д.т.н., проф., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Садигов В., к.т.н., доц., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Дашковський Сергій, DSc, Вюрцбурзький університет імені Юліуса та Максиміліана, Німеччина;
Клюс Олег, DSc, Морська Академія в Щецині, Польща;
Цисар Чаба, PhD, Будапештський університет технології та економіки, Угорщина;
Нзок Ан Мін, PhD, Технологічний університет Кочі, Японія;
Медведев Олександр, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Попова Олена, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Мезітіс Марекс, DSc, Транспортна академія, Латвія;
Нам Кю Парк, PhD, Університет ТонгМьонг, Південна Корея.

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 2 від 25.09.2024 р.)

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв,
назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.

Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися
з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою
програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 3(22), 2024

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2024

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3(22)
2024

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

Registration of Print media entity:
Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine
No. 1547 as of 09.05.2024

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications
of Ukraine (category “B”) in the field of economic and technical sciences
(051 – Economics, 073 – Management, 133 – Industry engineering,
271 – Maritime and inland transport, 275 – Transport technologies (by type).

Founder:
Odessa National Maritime University
Ukraine, 65029, Odesa, 34 Mechnykova St.

Editorial Board:
Editor-in Chief: Doctor of Engineering, Professor *Rudenko S.V.*
Deputy Editor-in Chief: DSc, Professor *Savelieva I.V.*
Executive Secretary: DSc, Associate Professor *Minchev D.S.*

Editorial Board Members:

DSc, Prof. *Varbanets R.A.*, ONMU;
DSc, Prof. *Dubrovskiy M.P.*, ONMU;
DSc, Prof. *Yehupov K.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Postan M.Ia.*, ONMU;
DSc, Prof. *Kyryllova O.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Lapkina I.O.*, ONMU;
DSc, Prof. *Piterska V.M.*, ONMU;
DSc, Prof. *Malaksiano M.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Nemchuk O.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Melnykov S.V.*, ONMU;
Filina-Davidovych L.S., Doctor of Engineering,
West Pomeranian University of Technology,
Szczecin, Poland;
Aymelek Murat, PhD, Izmir Katip Celebi University,
Turkey;
Maleki Vishkaei Behzad, PhD, Luiss University,
Italy;
Kolmykova Anna, DSc, University of Bremen,
Germany;
Lyubomirov Slavi Yassenov, PhD, University
of Plovdiv Paisii Hilendarsk, Bulgaria;

Duhovnik Joze, DSc, University of Ljubljana, Slovenia;
Gasanov V., Doctor of Engineering, Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Sadigov V., PhD in Engineering, Associate Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Dashkovskiy Sergey, DSc, Julius-Maximilians
University of Wurzburg, Germany;
Klyus Oleh, DSc, Maritime University of Szczecin,
Poland;
Csiszar Csaba, PhD, Budapest University
of Technology and Economics, Hungary;
Ngoc An Minh, PhD, Kochi University
of Technology, Japan;
Medvedev Alexander, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Popova Jelena, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Mezitis Mareks, DSc, Transport Academy, Latvia;
Nam Kyu Park, PhD, TongMyong University,
South Korea.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 2 dated September 25, 2024)

Authors are responsible for the reliability of facts, quotes, proper names, geographical names,
names of enterprises, organizations, institutions and other information.

The Editorial Board may not share the authors' opinion
and assumes no responsibility for the content of manuscripts.

Reprinting and translation are allowed with the consent of author and editors.

The articles were checked for plagiarism using the software StrikePlagiarism.com
developed by the Polish company Plagiat.pl.

З М І С Т

МЕНЕДЖМЕНТ

- О.Б. Гіріна, О.В. Меркт, К.О. Загородня**
Використання моделей економічного зростання для обґрунтування
сталого розвитку підприємств морегосподарського комплексу.....7
- V.V. Zhykharieva, V.M. Yastrebnyi**
Environmental criteria for sustainable development in strategic management
of sea transport companies..... 20

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- А.О. Ловська, А.О. Мурад'ян, П.В. Рукавішников, О.В. Демидюков**
Визначення навантаженості контейнера у разі його закріплення
в напіввагоні за допомогою пневмооболонок..... 30

**МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ
ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ**

- Р.А. Варбанець, Д.С. Мінчев, В.І. Залож**
Аналітичний метод визначення верхньої мертвої точки поршня
для системи параметричної діагностики судових дизелів.....41
- С.О. Зеленьок, Н.І. Александровська, С.А. Потравко**
Огляд перспективних напрямків покращення динамічних характеристик
судових електроенергетичних систем електроходів.....60
- О.М. Шумило**
Оцінка розмірної модернізації пасажирських суден
за критерієм міцності їх корпусів87

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

- О.В. Кириллова, В.Ю. Кириллова**
Мультимодальні перевезення у національному законодавстві
та міжнародному контексті.....106
- Ю.В. Шульдінер, Г.О. Примаченко, С.В. Петрик, Г.С. Пашенко**
Розвиток мультимодальних перевезень за сучасних умов.....123

C O N T E N T S

MANAGEMENT

- O.B. Girina, O.V. Merkt, K.O. Zagorodnia**
Use of economic growth models to justify the sustainable development
of enterprises of the maritime economic complex..... 7
- V.V. Zhykharieva, V.M. Yastrebnii**
Environmental criteria for sustainable development in strategic management
of sea transport companies..... 20

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

- A.O. Lovska, A.O. Muradian, P.V. Rukavishnikov, O.V. Demydiakov**
Determining the load of the container when it is fixed
in an open wagon using pneumatic shells 30

**SEA AND INLAND
WATER TRANSPORT**

- R.A. Varbanets, D.S. Minchev, V.I. Zalozh**
Analytical method for piston top dead center determination
in a parametric diagnostic system for marine diesel engines..... 41
- S.O. Zeleniuk, N.I. Aleksandrovska, S.A. Potravko**
Overview of prospective directions for improving
the dynamic characteristics of vessel electrical energy systems..... 60
- O.M. Shumylo**
Assessment of the dimensional modernization of passenger ships
by the criterion of their hull strength..... 87

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

- O.V. Kyryllova, V.Yu. Kyryllova**
Multimodal transport in national legislation
and international context..... 106
- J.V. Shuldiner, H.O. Prymachenko, S.V. Petryk, G.S. Pashchenko**
Development multimodal transportation in modern conditions..... 123

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 519.86:658

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.01>

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ЕКОНОМІЧНОГО ЗРОСТАННЯ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ МОРЕГОСПОДАРСЬКОГО КОМПЛЕКСУ

О.Б. Гіріна¹, О.В. Меркт², К.О. Загородня³

¹к.е.н., доцент кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-5917-6551

²к.е.н., доцент кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³здобувач 3 рівня вищої освіти,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0004-7536-8114

Анотація

Вступ. У досліджених роботах визначена модель Р. Солоу як базова та оптимальна для моделювання розвитку підприємств України в умовах посткризового відновлення. **Мета.** Ця стаття розглядає аналіз інвестиційної діяльності підприємства через призму моделей економічного зростання на прикладі розвитку державного підприємства «Морський торговельний порт Південний». Для виконання цього завдання використовується виробнича функція Кобба-Дугласа. **Результати.** Досліджено відображення науково-технічного прогресу в моделях економічного зростання, роль різних факторів у зростанні продуктивності праці. Детально проаналізовано моделі економічного зростання та продемонстровано можливий їхній вплив на діяльність морських торговельних портів. На підставі функції Кобба-Дугласа, розрахованої для компанії ДП «МТП Південний», розглядаються умови сталого розвитку підприємства. Аналізується коефіцієнт нейтрального технічного прогресу, рівноважна норма капіталовкладень. Для включення в модель Солоу побудована функція Кобба-Дугласа для продуктивності ефективної праці. Був виконаний аналіз факторів вартості основних виробничих фондів (ОВФ) та чисельності робітників на темп приросту продуктивності праці за звітні роки з урахуванням як екстенсивного, так і інтенсивного їх впливу. Доведено, що у звітному періоді компанії темпи приросту доходу, які дорівнюють темпам приросту виробничих фондів, свідчать про наявність рівноважного розвитку підприємства. З'ясоване співвідношення між середньою та граничною продуктивністю чисельності та капіталу. Граничний аналіз факторів росту чистого доходу показав, що фондовіддача ДП «МТП Південний» не змінюється за розглянутий період та дорівнює граничній продуктивності основних виробничих

фондів, тоді як середня та гранична продуктивність праці коливається по роках. Це також свідчить про те, що розвиток ДП «МТП Південний» має риси науково-технічного прогресу за Харродом. **Висновки.** Розглядаються можливість стало-го розвитку ДП МТП «Південний» за умов додержання у своєму розвитку встановленої рівноважної норми капітальних вкладень.

Ключові слова: моделі економічного зростання, сталий економічний розвиток, рівноважна норма капіталовкладень, інвестиційна діяльність, морський торговельний порт.

USE OF ECONOMIC GROWTH MODELS TO JUSTIFY THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENTERPRISES OF THE MARITIME ECONOMIC COMPLEX

O.B. Girina¹, O.V. Merkt², K.O. Zagorodnia³

¹Phd, Associate Professor at the Department "Management of logistics systems and projects",
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-5917-6551

²Phd, Associate Professor at the Department "Management of logistics systems and projects",
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³Obtainer of the 3rd level of higher education,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0004-7536-8114

Summary

Introduction. It is argued that R. Solow's model of factor analysis of sources of economic development should be recognized as the basic, most optimal model for modeling the development of problem regions of Ukraine in the conditions of post-crisis recovery. **Purpose.** This article examines the analysis of the enterprise's investment activity through the prism of economic growth models using the example of the development of the state-owned enterprise "Southern Trade Port". To accomplish this task, the Cobb-Douglas production function is used. **Results.** The special value of this model is that it takes into account the impact on the volume of production not only of factors of labor and capital, but also changes in the savings rate, population growth and technological progress. The conditions of neutral technical progress according to Higgs, Harrod and Solow, modifications of the production function of Cobb Douglas in different cases are considered. On the basis of the Cobb-Douglas function, calculated for the SE "STP Pivdenny", the conditions of sustainable development of the enterprise are considered. The coefficient of neutral scientific and technical progress, the equilibrium rate of capital investments are analyzed. Based on the Cobb-Douglas function elasticity coefficients, the actual and equilibrium capital investment rate are also calculated. The average value of the equilibrium rate for the considered period is slightly higher than the average actual rate of capital investments of the port. The marginal analysis of the growth factors of net income showed that the capital return does not change during the considered period and was equal to the marginal productivity of the main productive assets, while the average and marginal labor productivity fluctuate and take different values by the years. This shows that the development of the State Enterprise

*"STP Pivdenny" has the features of technical progress according to Harrod. **Conclusions.** The possibility of sustainable development of SE "STP Pivdenny" is being considered under the conditions of compliance with the established equilibrium rate of capital investments in its development.*

Key words: *models of economic growth, sustainable economic development, equilibrium rate of capital investments, investment activity, sea trade port.*

Постановка завдання. Економічне зростання є надзвичайно складною економічною категорією, що характеризує розвиток суспільного виробництва. Економічне зростання являє собою зростаючу здатність економіки до реалізації своїх виробничих можливостей.

У роботі Салатюка Н.М. [1] розглядаються актуальні аспекти переходу до моделі сталого розвитку в Україні. «Сталий економічний розвиток» – це ширше поняття, ніж «економічне зростання», і включає останнє в себе як найважливішу умову. Тому сталий розвиток визначається традиційними факторами економічного зростання, які його забезпечують, тобто факторами пропозиції, факторами попиту і розподілу, але при цьому він охоплює значно ширше їх коло: розвиток науки, технологій, інформаційних послуг, політичні і соціально-економічні фактори, а також і екологічні чинники, які в комплексі є джерелами сталого розвитку.

Необхідність використання системного і комплексного підходу в аналізі стійкості економічного зростання та сталого розвитку підприємств посилює вимоги до методологічного інструментарію досліджень. Це робить вибір та використання моделі економічного зростання актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існують чотири провідних теорій і відповідні їм напрями моделювання економічного розвитку: кейнсіанська, некейнсіанська, неокласична та історико-соціологічна, аналіз яких виконується в статті О.Б. Панькова [2]. Кейнсіанські моделі економічного зростання, як і теорія Кейнса, засновані на визначальній ролі попиту для збалансованого економічного розвитку. Реальному стану сучасної економіки найбільшою мірою відповідають (на думку більшості вчених-економістів) некейнсіанські моделі економічного розвитку, що описують залежність між динамікою ефективного попиту і рівномірністю зростання обсягів виробництва та доходів. Неокласичні моделі досліджують окремі техніко-економічні умови збалансованого зростання в умовах спрощеної раціональної виробничої системи, де виключаються всі суперечності між виробництвом і споживанням.

За результатами порівняльного аналізу моделей економічного розвитку (В. Леонтєва, Дж. Кейнса, Е. Домара, Р. Харрода, Кобба-Дугласа, Р. Солоу) [2; 3, с. 41] можна констатувати, що базовою, найбільш оптимальною для моделювання розвитку проблемних регіонів України в умовах посткризового відновлення слід визнати модель факторного аналізу джерел економічного розвитку Р. Солоу. Технологія виробництва в цій моделі подається за допомогою виробничої функції Кобба-Дугласа.

У статті С.С. Шумської [4, с. 142] йдеться про те, що виробничі функції (ВФ) – це не тільки один зі способів прогнозування розвитку економіки, а й прикладний інструмент, який використовується для оцінки та порівняння ефективності

економік. Для України, де одним з актуальних питань сьогодення є виявлення резервів зростання національної економіки, використання ВФ може дати поштовх до удосконалення наявних механізмів управління та активізації внутрішніх факторів розвитку. Не менш активно сьогодні апарат ВФ використовується у дослідженнях, де автори намагаються статистично оцінити роль різних факторів у зростанні продуктивності праці.

У статті О.В. Овчаренко, В.І. Дубницького [6, с. 405] доводиться, що найбільш оптимальною з точки зору системної взаємодії основних економічних факторів розвитку проблемного регіону в посткризових умовах є модель факторного аналізу джерел економічного зростання Р. Солоу [5, с. 67]. Особлива цінність цієї моделі полягає в тому, що вона враховує вплив на обсяг виробництва не тільки факторів праці і капіталу, але й зміни норми заощаджень, зростання чисельності населення і технологічний прогрес, що і робить її ефективним інструментом аналізу впливу конкретної економічної політики на стан економіки в цілому, рівень та якість життя населення, а також перспективи соціально-економічного розвитку регіону.

У роботі О.В. Овчаренко, В.І. Дубницького [6] виконано розрахунки економічного зростання для Дніпропетровського регіону шляхом використання виробничої функції Кобба-Дугласа та моделі Соллоу. Для того щоб можна було розрахувати норму інвестицій, норму капітальних вкладень, норму капіталоозброєності за «золотим правилом», автори проаналізували амортизаційні відрахування, капітальні інвестиції, валовий регіональний продукт (ВРП), основні виробничі фонди та кількість працездатного населення.

За золотим правилом накопичення необхідно знайти максимум споживання на одного зайнятого в кожному періоді і визначити його залежність від капіталоозброєності праці. У результаті розрахунків встановлюється, що обсяг споживання на одного працюючого досягає максимуму, коли темп приросту капіталу дорівнює його граничній продуктивності [3, с. 46].

У базовій моделі Солоу при заданих параметрах n (темпер приросту чисельності) і g (темпер приросту нейтрального прогресу) кожному значенню

норми заощадження s відповідає єдине стаціонарне значення фондоозброєності ефективної праці F' і відповідний обсяг споживання c . Стаціонарний режим, у якому споживання максимальне, називають «золотим правилом». «Золоте правило» – це правило розподілу випуску на споживання та накопичення, що забезпечує максимальне стаціонарне споживання. Сам термін «золоте правило», а також метод розрахунку оптимальної норми заощадження були вперше запропоновані Е. Фелпс у 1961 році.

У роботі О.О. Бакаєва зі співавторами [7, с. 73] аналізуються типи нейтрального технічного прогресу. Якщо технічний прогрес не змінює функціонального розподілу між працею (L_t) і капіталом (K_t), то його називають нейтральним. Стала частка праці і капіталу в національному доході може збігатися за різного виду обставин. Відношення граничної продуктивності капіталу (rK) до граничної продуктивності праці (wL) rK / wL буде сталим, якщо капіталоозброєність постійна за часом $F_t = K_t / L_t = const$ а $r_t / w_t = const$, де граничні продуктивності капіталу $r_t = \partial Y_t / \partial K_t$ та праці $w_t = \partial Y_t / \partial L_t$ також не змінюються. Отже, якщо технічний

прогрес розвивається таким чином, що при заданій капіталоозброєності праці з однаковими темпами зростають граничні продуктивності і праці, і капіталу, то пропорція національного доходу не змінюється. Такий тип технічного прогресу називається нейтральним за Хігсом і відображається виробничою функцією обсягу виробництва (1):

$$Y_t = (1 + h)^t * K_t^\alpha * L_t^{1-\alpha} \quad (1)$$

де h – темп розвитку технічного прогресу.

Пропорція розподілу національного доходу між працею та капіталом не змінюється і в тому разі, коли середня продуктивність капіталу $y_{it} / K_t = \sigma_t = const$ і гранична продуктивність капіталу $\partial y_{it} / \partial K_t = r_t = const$ постійні, тобто кожному значенню середньої продуктивності капіталу відповідає незмінне значення його граничної продуктивності. Такий вид технічного прогресу називається нейтральним за Харродом. Алгебраїчно він відображається виробничою функцією (2):

$$Y_t = K_t^\alpha * [(1 + \lambda)^t L_t]^{1-\alpha}, \quad (2)$$

де λ – темп приросту продуктивності праці внаслідок технічного прогресу.

Відповідно, існує випадок, коли постійними є продуктивність праці ($y_{it} / L_t = q_t = const$) і гранична продуктивність праці ($\partial y_{it} / \partial L_t = w_t = const$), тобто кожному значенню середньої продуктивності праці відповідає незмінне значення його граничної продуктивності. Такий вид технічного прогресу називається нейтральним за Солоу і відображається виробничою функцією (3):

$$Y_t = L_t^{1-\alpha} * [(1 + \mu)^t K_t]^\alpha, \quad (3)$$

де μ – темп приросту продуктивності капіталу внаслідок технічного прогресу. [7]

Дуже поширеною є виробнича функція Кобба-Дугласа-Тінбергена, яка описує співвідношення між факторами і результатами виробництва на будь-якому рівні економічної діяльності (фірма, галузь, регіон, економіка в цілому), яка аналізується в роботі Ю.Г. Козак зі співавторами [8, с. 138]:

$Y = Ax_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} \dots x_m^{b_m} e^{\lambda t}$, де b_i – коефіцієнт еластичності i -го ресурсу за умови незмінності інших факторів, а тренд результату, зумовлений дією інших неекстенсивних (невиробничих) факторів, враховується в моделі змінною часу.

На практиці використовують різні модифікації цієї виробничої функції. Наприклад, розділивши обидві її частини на чисельність працюючих (L), отримаємо функцію продуктивності праці (W_t) від фондоозброєності (F_t):

$$W_t = AF_t^\alpha e^{\lambda t}.$$

Модель Солоу має не лише загальнотеоретичне, а й важливе прикладне значення. Практичне її застосування представлено у багатьох роботах зарубіжних авторів, присвячених вивченню цілого ряду актуальних проблем сучасної економічної політики. Модель Солоу показала, що існує безліч можливих шляхів досягнення стійкого довгострокового економічного зростання та рівноваги. Важливим є й те, що модель фокусується переважно на технологічному прогресу як джерелі зростання і не розглядає питання ефективності попиту [8, с. 168].

Огляд робіт, присвячених використанню моделі Солоу для обґрунтування сталого розвитку підприємств та народного господарства в цілому, показують

можливість застосування функції Кобба-Дугласу у різних модифікаціях для розкриття характеру розвитку підприємств та вдосконалення їхньої виробничої діяльності [9, с. 310; 10]. Для підвищення ефективності виробництва та розкриття умов рівноважного розвитку підприємств необхідно поширювати впровадження теоретичних засад у цьому напрямі у різних галузях виробництва, що робить поставлене завдання актуальним.

Метою статті є аналіз та дослідження інвестиційної діяльності підприємств морегосподарського комплексу через призму моделей економічного зростання на прикладі розвитку державного підприємства «Морський торговельний порт Південний». Для виконання цього завдання використовується виробнича функція Кобба-Дугласа, яка стала одним із найбільш точних і універсальних інструментів економічного аналізу і моделювання, а також є основою для створення цілого напрямку багатofакторних моделей економічного розвитку, зокрема моделі Р. Солоу.

Виклад основного матеріалу. Модель Солоу дає змогу більш точно описати особливості макроекономічних процесів як на макроекономічному рівні, так і на рівні окремих підприємств. По-перше, виробнича функція у цій моделі нелінійна і має властивість спадання граничної продуктивності. По-друге, модель враховує вибуття основного капіталу. По-третє, у модель Солоу включається опис динаміки трудових ресурсів і технічного прогресу та їхній вплив на економічне зростання.

Для аналізу економічного розвитку порту на підставі звітних даних ДП «МТП Південний» за 2017–2020 роки [11] була розрахована виробнича функція Кобба-Дугласа обсягу виробництва за найбільш загальною формулою (1).

Таблиця 1

**Розрахунок функції Кобба-Дугласа обсягу виробництва
ДП «МТП Південний»**

| t | Роки | Дохід, Y | ОВФ, K | Чисельність, L | Yapr | Z | (1+h)^t |
|------|-------|----------|-----------|---|-----------|------------|---------|
| 1 | 2017 | 1522480 | 2035232,8 | 2811 | 1518430,4 | 16399588,6 | 1,01 |
| 2 | 2018 | 1698107 | 2270008,9 | 2860 | 1700818,9 | 7354883,6 | 1,02 |
| 3 | 2019 | 2018196 | 2697900 | 2875 | 2023037,8 | 23443251,1 | 1,03 |
| 4 | 2020 | 2477653 | 3312096,6 | 2705 | 2474393,5 | 10624490,1 | 1,03 |
| Сума | | 7716436 | - | - | 7716681 | 57822213,0 | - |
| α | 0,954 | | h=0,0085 | $Yt(apr) = (1 + h)^t * Kt^\alpha * Lt^{(1 - \alpha)}$ | | | |

Джерело: розраховано авторами

У таблиці 1 представлена апроксимація функції доходів (4) ДП «МТП Південний» за чотири роки:

$$Y(t)apr = (1 + 0.0085)^t * K(t)^{0.954} * L(t)^{0.046} \quad (4)$$

Розрахунки коефіцієнтів регресії виконувалися в EXCEL у пошуку рішень.

Коефіцієнт еластичності основних виробничих фондів (ОВФ) $\alpha=0,954$ значно більший за коефіцієнт еластичності чисельності працюючих $1 - \alpha=1-0,954 = 0,046$. Це свідчить про те, що порт має фондоемне виробництво. Темп розвитку технічного прогресу дорівнює $h=0.0085$. Розглядаючи виробничу функцію (1) в темпах

приросту за формулою (5), можна розрахувати частки впливу факторів екстенсивного та інтенсивного характеру на темп приросту доходу відповідно до формул (6)-(8). Розрахунки представлені в таблиці 2.

$$yT(t) = \alpha \cdot k(t) + (1 - \alpha) \cdot l(t) + h(t) \quad (5)$$

$$y_k(t) = \frac{\alpha \cdot k(t)}{yT(t)}, \quad (6)$$

$$y_l(t) = \frac{(1 - \alpha) \cdot l(t)}{yT(t)} \quad (7)$$

$$y_h(t) = \frac{h(t)}{yT(t)} \quad (8)$$

Таблиця 2

Частки екстенсивних та інтенсивних факторів росту темпу приросту доходу ДП «МТП Південний» за 2017–2020 роки

| Роки | Темпи приросту | | | | Частка, % | | |
|------|----------------|---------------|--------------------|----------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| | ОВФ | Праці | Доходу (фактичний) | Доходу (теоретичний) | Капіталу (ОВФ) | Праці (чисельності) | Інтенсивних факторів |
| | $k(t) = dK/K$ | $l(t) = dL/L$ | $y = dY/Y$ | $yT(t)$ | $y_k(t)$ | $y_l(t)$ | $y_h(t)$ |
| 2017 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | 0,10 | 0,02 | 0,10 | 0,11 | 91,4 | 0,73 | 7,87 |
| 2019 | 0,16 | 0,01 | 0,16 | 0,16 | 94,5 | 0,15 | 5,31 |
| 2020 | 0,19 | -0,06 | 0,19 | 0,18 | 96,9 | -1,58 | 4,66 |

Джерело: розраховано авторами

З таблиці 2 видно, що частка впливу на темп приросту доходу екстенсивних факторів росту капіталу значно більше 91,4 % – 96,9 %, ніж вплив праці (-1,58) - (0,73) %. Частка приросту доходу за рахунок інтенсивних факторів виробництва коливається від 4,7 % до 7,87 %. Висновок із цих розрахунків очевидний: у довгостроковому періоді основним фактором економічного зростання є розвиток техніки та технології.

На підставі коефіцієнтів еластичності функції Кобба-Дугласа (4) були також розраховані фактична (9) та рівноважна (10) норми капітальних вкладень. Середня величина фактичної норми за розглянутий період (0,19 %) наближається до рівноважної середньої норма капіталовкладень порту (0,22 %) (табл. 3). Про рівноважний розвиток порту у 2017–2020 роки свідчить також значення темпів приросту валового доходу та основних виробничих фондів, які дорівнюють одне одному по роках ($k(t) = y(t)$) (табл.2). Виконані розрахунки доказують можливість сталого розвитку ДП МТП «Південний» за умов додержання у своєму розвитку встановленої рівноважної норми капітальних вкладень.

$$Af(t) = \frac{dK(t)}{X(t)} = \frac{K(t) - K(t-1)}{X(t)} \quad (9)$$

$$Ar(t) = \frac{1}{e(t)} * \left(l(t) + \frac{h(t)}{1-\alpha} \right) \quad (10)$$

де $e(t)$ – ефективність капітальних вкладень.

$$e(t) = \frac{dX(t)}{dK(t)} = \frac{X(t) - X(t-1)}{K(t) - K(t-1)} \quad (11)$$

Таблиця 3

Фактична та рівноважна норма капітальних вкладень ДП «МТП Південний»

| Роки t | Ефективність E(t) | Фактична норма АФ(t), % | Рівноважна норма Ар(t), % |
|-----------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
| 2017 | - | - | - |
| 2018 | 0,75 | 0,14 | 0,27 |
| 2019 | 0,75 | 0,21 | 0,26 |
| 2020 | 0,75 | 0,25 | 0,16 |
| Середні | 0,75 | 0,19 | 0,22 |

Джерело: розраховано авторами

Для включення в модель Солоу-Свана вводиться позначення ефективної праці E_t , та на його підставі функції продуктивності W та фондоозброєності F' :

$$E_t = e^{\lambda t} L_t; W' = Y/E; F' = K/E \quad (12)$$

де e – основа натурального логарифма; λ – темп технічного прогресу, який виражається через умовне значення кількості використаної праці за період часу. Тоді темп приросту показника фондоозброєності ефективної праці f' дорівнює:

$f' = k - \bar{E} - k - l - \lambda$, де k, \bar{E}, λ, l – темпи приросту відповідно капіталу, ефективної праці, технічного прогресу та трудових ресурсів.

З використанням позначень (12) функція продуктивності ефективної праці буде мати вигляд (13):

$$Wapr = \left(\frac{K_t}{L_t \cdot e^{\lambda t}} \right)^{\alpha} = (F_t')^{\alpha} \quad (13)$$

За формулою (13) по звітним даним ДП «МТП Південний» за 2017–2020 роки побудована функція Кобба-Дугласа для продуктивності праці (14) в таблиці 4.

$$Wapr = \left(\frac{K_t}{L_t \cdot e^{0.0089t}} \right)^{0.954} = (F_t')^{0.954} \quad (14)$$

У темпах приросту функція (13) записується таким чином:

$$w' = \alpha (f') = \alpha (k - l - \lambda) \quad (15)$$

де w' – темп приросту продуктивності ефективної праці.

Внесок екстенсивних та інтенсивних факторів у динаміку продуктивності праці визначаються за такими формулами (16; 17):

$$d_{екс} = \alpha (k - l) / w \quad (16)$$

$$d_{инт} = \frac{-\alpha \cdot \lambda}{w} \quad (17)$$

Таблиця 4

Розрахунок функції Кобба-Дугласа продуктивності праці
ДП «МТП Південний»

| Роки | Дохід | ОПФ | Чисельність робітників | Фондоозброєність | Продуктивність праці | Апроксимація W | Функція найменших квадратів |
|-----------|---------|--|------------------------|------------------|----------------------|----------------|-----------------------------|
| t | Y | K | L | F=Y/K | W=Y/L | Wapr | Z=(WWapr)^2 |
| 2017 | 1522480 | 2035233 | 2811 | 0,748 | 541,6151 | 540,1937 | 2,020 |
| 2018 | 1698107 | 2270009 | 2860 | 0,748 | 593,7437 | 594,724 | 0,961 |
| 2019 | 2018196 | 2697900 | 2875 | 0,748 | 701,9812 | 703,7162 | 3,010 |
| 2020 | 2477653 | 3312097 | 2705 | 0,748 | 915,953 | 914,8312 | 1,259 |
| сума | 7716436 | | | | 2753,293 | 2753,465 | 7,250 |
| α | 0,954 | $Wapr = \left(\frac{K_t}{L_t \cdot e^{-0.0089t}}\right)^{0.954} = (Ft')^{0.954}$ | | | | | |
| λ | -0,0089 | Функція апроксимації продуктивності ефективної праці | | | | | |

Джерело: розраховано авторами

Можна зазначити, що коефіцієнти регресії у функціях Кобба-Дугласа, розраховані за формулами (4) для чистого доходу та (14) продуктивності праці, збігаються.

Фондоозброєність праці МТП Південний не змінюється у звітному періоді (у 2017–2020 роках). Був виконаний аналіз факторів вартості основних виробничих фондів (ОВФ) та чисельності виробничих робітників на темп приросту продуктивності праці за звітні роки з урахуванням як екстенсивного, так і інтенсивного їх впливу. З таблиці 5 видно, що частка впливу екстенсивних факторів росту капіталу значно більша 109 % – 72,0 %, ніж вплив праці (-18.1) – (24) %. Частка приросту продуктивності праці за рахунок інтенсивних факторів виробництва коливається від 3,5 % до 9,71% .

Таблиця 5

Аналіз часток екстенсивних та інтенсивних факторів росту продуктивності праці ДП «МТП Південний» за 2018–2020 роки

| Роки | Темпи приросту | | | | | Частка факторів росту продуктивності праці, % | | |
|------|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|--|---|--------|-----------|
| | Продуктивності | Фондоозброєності | Капіталу (ОВФ) | Праці (Чисельності) | Теоретичний темп приросту продуктивності | | | |
| | $w(t)=\frac{dW}{W}$ | $f=dF/F$ | $k(t)=\frac{dK}{K}$ | $l(t)=\frac{dL}{L}$ | $w(\text{теор})=$ | $k(t)$ | $l(t)$ | λ |
| 2018 | 0,088 | 0,091 | 0,103 | 0,017 | 0,091 | 108,7 | -18,0 | 9,3 |
| 2019 | 0,154 | 0,15 | 0,159 | 0,005 | 0,15 | 97,7 | -3,2 | 5,5 |
| 2020 | 0,234 | 0,245 | 0,185 | -0,063 | 0,245 | 72,1 | 24,4 | 3,5 |

Джерело: розраховано авторами

Таким чином, можна побачити, що темпи приросту доходу від реалізації дорівнюють темпам приросту основних виробничих фондів (табл. 2), темпи приросту продуктивності та фондоозброєності рівні за роками, що аналізувалися (табл. 5). Це свідчить про те, що продуктивність праці та капіталоозброєність зростають сталими темпами, тобто компанія ДП «МТП Південний» розвивається з нейтральним за Харродом технічним прогресом. Тобто розглянута модель показує, що розвиток ДП «МТП Південний» досягає стійкого стану та характеризується постійним обсягом виробництва і запасів капіталу.

Для стійкого зростання з повним використання праці і капіталу буде потрібна не тільки їх технологічна взаємозамінна, а й певне співвідношення їх продуктивностей. Проте не при всіх різновидах технічного прогресу можливе рівноважне зростання. Це впливає з того, що у разі рівноважного зростання маємо рівні темпи приросту доходу (y) та капіталу (k):

$$y = k = \frac{dK_t}{K_t} = \frac{sY_t}{K_t} = \frac{sY_{t/K_t}}{K_{t/K_t}} = s\sigma = const$$

де $\sigma = Y_t / K_t$ продуктивність капіталу, s – норма заощадження.

Оскільки при динамічній рівновазі рівноважна норма заощадження стала, то і продуктивність капіталу не повинна змінюватися, що буває лише при нейтральному за Харродом технічному прогресі [4–5].

Таблиця 6

Аналіз середньої та граничної продуктивності капіталу та праці «МТП Південний» за 2017–2020 роки

| Роки | Чистий дохід, тис.грн | ОВФ, млн грн. | Чисельність робітників | Продуктивність капіталу(Фондо- віддача) | Гранична Продуктивність фондів | Продуктивність праці | Гранична про- дуктивність праці |
|------|--------------------------|---------------|---------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| t | Y | K | L | $\sigma=Y/K$ | $r=dY/dK$ | $q=Y/L$ | $w= dY/dL$ |
| 2017 | 1522480 | 2035,23 | 18913 | 748,06 | - | 80,50 | - |
| 2018 | 1698107 | 2270,01 | 20183 | 748,06 | 748,06 | 84,14 | 138,29 |
| 2019 | 2018196 | 2697,9 | 20576 | 748,06 | 748,06 | 98,08 | 814,48 |
| 2020 | 2477653 | 3312,1 | 20049 | 748,06 | 748,06 | 123,58 | -871,83 |

Джерело: розраховано авторами

Граничний аналіз факторів росту чистого доходу показав, що фондовіддача (продуктивність капіталу) ДП «МТП Південний» не змінюється за розглянутий період та дорівнює граничній продуктивності основних виробничих фондів 748,06, тоді як середня та гранична продуктивність праці коливаються та набувають різні значення по роках (табл. 6). Це також свідчить про те, що розвиток ДП «МТП Південний» має риси науково-технічного прогресу за Харродом.

З рівноважним технічним прогресом сумісний нейтральний за Харродом технічний прогрес.

Висновки. У статті розглянута модель економічного зростання Солоу як інструмент для обґрунтування умов сталого рівноважного зростання підприємства. Описані види нормального технологічного прогресу та «золоте правило» стаціонарного розвитку підприємства.

На підставі звітної інформації за 2017–2020 роки компанії ДП «МТП Південний» розрахована функція Кобба-Дугласа для доходу від реалізації залежно від виробничих фондів, чисельності працюючих та темпу приросту нейтрального технічного прогресу. Виконаний аналіз впливу на темп приросту доходів різних факторів та норми капітальних вкладень рівноважного розвитку.

Виробнича функція для продуктивності ефективної праці побудована також на підставі звітної інформації за 2017–2020 роки компанії ДП «МТП Південний». Виконаний аналіз темпів приросту продуктивності праці за факторами виробництва – вартістю основних виробничих фондів, чисельністю працюючих та темпом приросту інтенсивних факторів. Доведено, що у звітному періоді компанії темпи приросту доходу, які дорівнюють темпам приросту виробничих фондів, свідчать про наявність рівноважного розвитку підприємства. З'ясоване співвідношення між середньою та граничною продуктивністю чисельності та капіталу. Середня продуктивність капіталу компанії за розглянутий період постійна та дорівнює граничній продуктивності, що свідчить про наявність нейтрального технічного прогресу за Харродом.

Розрахунки за «золотим правилом» розподілу випуску продукції потребують додаткової інформації для кореляційно-регресійного аналізу витратних показників виробництва та максимізації споживання на одиницю ефективної праці, що може бути предметом наступних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Салатюк Н.М. Актуальні аспекти переходу до моделі сталого розвитку в Україні. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7c506a63-48ab-46f1-a155-042749de7879/content>
2. О.Б. Паньков. Моделі економічного зростання як база дослідження інвестиційної діяльності підприємства. *Ефективна економіка*. 2016. № 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5205>
3. Білак Г.Г. Методичні підходи до формування моделі організації територіального економічного розвитку в регіоні. *Вісник Мукачівського державного університету. Серія «Економіка»*. 2014. Випуск 1(1). С. 40–50. URL: <http://dspace-s.msu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/2779/1/1-4-1-2014-10.pdf>
4. Шумська С.С. Виробнича функція в економічному аналізі: теорія та практика використання. *Економіка та прогнозування*. 2007. № 2. С. 138–154. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_07_2_138_uk.pdf
5. Solow R. A contribution to the theory of economic growth. *Quart J. Econ.* 1956. Vol. 70. P. 65–94. URL: <http://piketty.pse.ens.fr/files/Solow1956.pdf>
6. Овчаренко О.В. Дубницький В.І. Економічне зростання як визначальний чинник економічної безпеки регіону: застосування моделі Солоу. *Східна Європа : економіка, бізнес та управління*. 2019. Випуск

- № 3 (20). С. 403–410. URL: https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/61.pdf
7. Економіко-математичні моделі економічного зростання / О.О. Бакаєв, В.І. Гриценко, Л.І. Бажан, Л.О. Бакаєв, К.А. Бобер. Київ : Наукова думка, 2005. 190 с.
 8. Математичне моделювання для економістів : бакалавр – магістр – доктор філософії (PhD) : навчальний посібник / за редакцією Ю.Г. Козак, В.М. Мацкул. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 252 с.
 9. Вітлінський В.В. Моделювання економіки : навчальний посібник Київ : КНЕУ, 2003. 408 с. URL: https://kneu.edu.ua/ua/science_kneu/scientific_schools/mtrve/mtrve_praci/mtrve_prazi/modeconnpos/
 10. Модель Солоу – Свона. *Вікіпедія*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%83
 11. Фінансові результати ДП «МТП Південний». URL: <https://www.port-yuzhny.com.ua/finansivie-rezultaty>

REFERENCES

1. Salatyuk N.M. Current aspects of the transition to a model of sustainable development in Ukraine. [Aktual'ni aspekty perekhodu do modeli staloho rozvytku v Ukrayini]. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7c506a63-48ab-46f1-a155-042749de7879/content> [in Ukrainian].
2. O.B. Pankov. (2016) Models of economic growth as a basis for the study of investment activity of the enterprise. [Modeli ekonomichnoho zrostannya yak baza doslidzhennya investytsiynoyi diyal'nosti pidpryyemstva]. Efficient economy. No. 10. [in Ukrainian]. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5205>
3. Bilak H.G. (2014). Regional socio-economic studies. [Rehional'ni sotsial'no-ekonomichni doslidzhennya]. Bulletin of Mukachevo State University, P.40-50 Economy Series. Issue 1(1). 40-50 Seriya Ekonomika. Vypusk 1(1). URL: <http://dspace-s.msu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/2779/1/1-4-1-2014-10.pdf> [in Ukrainian].
4. Shumska S.S. (2007) Production function in economic analysis: theory and practice of use. [Vyrobnycha funktsiya v ekonomichnomu analizi: teoriya ta praktyka vykorystannya]. Economics and forecasting. № 2. 138–154. [in Ukrainian]. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_07_2_138_uk.pdf
5. Solow R. (1956). A contribution to the theory of economic growth / R. Solow // Quart J. Econ. Vol. 70. P. 65–94. URL: <http://piketty.pse.ens.fr/files/Solow1956.pdf>
6. Ovcharenko O.V. Dubnytskyi V.I. Economic growth as a determining factor of economic security of the region: application of the Solow model. [Ekonomichne zrostannya yak vyznachal'nyy chynnyk ekonomichnoyi bezpeky rehionu: zastosuvannya modeli Solou]. Eastern Europe: economy, business and management. DEVELOPMENT OF PRODUCTIVE FORCES AND REGIONAL ECONOMY Issue 3 (20) 2019.405-410.

- URL: https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/61.pdf [in Ukrainian].
7. O.O. Bakaev, V.I. Hrytsenko, L.I. Bazhan, L.O. Bakaev, K.A. Bober. (2005). Economic and mathematical models of economic growth. [Ekonomiko-matematychni modeli ekonomichnoho zrostannya] Kyiv, Scientific opinion, 190. [in Ukrainian].
 8. Mathematical modeling for economists: bachelor's degree – master's degree – doctor of philosophy (PhD) (2017) [Matematychni modelyuvannya dlya ekonomistiv : bakalavr – mahistr – doktor filosofiyi (PhD)] Teaching manual/ Edited by Y.G. Kozak, V.M. Matskul. K.: Center for Educational Literature, 252 . [in Ukrainian].
 9. Vitlinsky V.V.(2003) Modeling of the economy: teaching. manual [Modelyuvannya ekonomiky] / Vitlinsky V.V. K.: KNEU. 408p.: navch. posibnyk. K.: KNEU. 408. https://kneu.edu.ua/ua/science_kneu/scientific_schools/mtrve/mtrve_praci/mtrve_prazi/modeconnpos/[in Ukrainian].
 10. The Solow-Swan model. [Model' Solou—Svona]. Vikipediya. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%B%D1%8C_%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%83
 11. Financial results of SE "MTP Pivdenny". [Finansovi rezul'taty DP «MTP Pivdenny».] URL: <https://www.port-yuzhny.com.ua/finansivie-rezultaty>

ENVIRONMENTAL CRITERIA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN STRATEGIC MANAGEMENT OF SEA TRANSPORT COMPANIES

V.V. Zhykharieva¹, V.M. Yastrebnii²

¹Doctor of Economics, Professor, Head of Economics and Finance Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²Postgraduate of the Economics and Finance Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0004-2916-7776

Summary

Introduction. The relevance of the research topic is due to the significant impact of environmental factors on the world economy, in particular, the shipping industry, and increased attention from investors, regulators, employees and other stakeholders to the environmental aspects of the activities of transport and logistics companies. **Purpose.** The article is devoted to the improvement of the methodological and methodical foundations of the development of the corporate strategy of transport companies, taking into account the environmental criteria of sustainable development, based on the analysis of the practical experience of shipping and logistics companies, and the study of new approaches to financing investing in projects directed to the solution of environmental problems in the shipping industry. **Results.** The practical experience of development the corporate strategy by shipping and logistics companies taking into consideration environmental factors is systematized. The role of The Poseidon's Principles in financing investments related to solving environmental problems in the shipping industry and new instruments for financing investments in projects related to solving environmental problems in shipping based on long-term debt financing are determined. A universal structure of environmental criteria for sustainable development of shipping and logistics companies is proposed. **Conclusions.** The most important environmental factors for shipping and logistics companies include: emission reduction, wastewater treatment system, decarbonization of supply chains, green fuel and promotion of ship recycling. The practical benefit of The Poseidon Principles, which are widely recognized by the largest financial institutions in the shipping industry, is that companies must measure their emissions annually and publish the results, indicating the extent to which specific measures meet strategic commitments to gradually reduce emissions. To finance projects related to solving environmental problems, it is advisable to attract long-term investments through the targeted issuance of corporate green bonds. The universal structure of environmental criteria for sustainable development for transport and logistics companies should include the formation of environmental policies, plans and periodic review of intermediate goals; creation of an environmental management system; setting deadlines for achieving goals in accordance with the requirements of international organizations and state legislation; an obligation to use only fuel that meets standards and an active focus on reducing fuel consumption; development of ship modification and conversion

programs; improvement of operational efficiency; introduction of energy-efficient and decarbonization technologies and equipment; promotion of green recycling of ships; improvement of the ballast water treatment system; support for research, financing, development and implementation of ship facilities to improve the energy efficiency of ships. The integration of environmental criteria into the strategic management of the enterprise helps to ensure a balance between achieving profit and preserving nature, improving the lives of employees and maintaining high standards of corporate responsibility.

Key words: environmental criteria, sustainable development, greenhouse gases, emissions, transport and logistics infrastructure, maritime transport, shipping, strategic management, green investments.

ЕКОЛОГІЧНІ КРИТЕРІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В СТРАТЕГІЧНОМУ УПРАВЛІННІ ПІДПРИЄМСТВАМИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

В.В. Жихарєва¹, В.М. Ястребний²

¹д.е.н., професор, завідувач кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²аспірант кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0004-2916-7776

Анотація

Вступ. Актуальність теми дослідження зумовлена суттєвим впливом екологічних факторів на світову економіку, зокрема судноплавну галузь, і підвищеною увагою з боку інвесторів, регуляторів, працівників та інших стейкхолдерів до екологічних аспектів діяльності транспортних та логістичних компаній. **Мета.** Стаття присвячена удосконаленню методологічних та методичних засад розробки корпоративної стратегії транспортних підприємств з урахуванням екологічних критеріїв сталого розвитку та на основі аналізу практичного досвіду судноплавних та логістичних компаній, а також дослідженню нових підходів до фінансування інвестицій у проекти, пов'язані з вирішенням екологічних проблем у судноплавній галузі. **Результати.** Систематизований практичний досвід урахування екологічних аспектів під час розробки корпоративної стратегії судноплавними та логістичними компаніями. Визначено роль Принципів Посейдона у фінансуванні інвестицій, пов'язаних з вирішенням екологічних проблем у судноплавстві, і нові інструменти фінансування інвестицій у проекти, спрямовані на вирішення екологічних проблем у галузі, на основі довгострокового боргового фінансування. Запропоновано універсальну структуру екологічних критеріїв сталого розвитку судноплавних і логістичних компаній. **Висновки.** Найважливіші екологічні фактори для судноплавних і логістичних компаній включають скорочення викидів, систему очищення стічних вод, декарбонізацію ланцюгів постачання, екологічне паливо і просування ресайклінгу суден. Практична користь Принципів Посейдона, які широко визнані найбільшими фінансовими установами в судноплавній галузі, полягає в тому, що підприємства повинні щорічно вимірювати свої викиди та публікувати результати із зазначенням ступеня відповідності конкретних заходів стратегічним зобов'язанням щодо поступового скорочення викидів газів. До фінансування проектів, пов'язаних із

вирішенням екологічних проблем, доцільно залучати довгострокові інвестиції шляхом цільового випуску корпоративних зелених облігацій. Універсальна структура екологічних критеріїв сталого розвитку для транспортно-логістичних компаній повинна включати розробку екологічної політики, планів і періодичний перегляд проміжних цілей; створення системи екологічного управління; встановлення строків досягнення цілей відповідно до вимог міжнародних організацій та законодавства держави; зобов'язання використовувати паливе, яке відповідає стандартам, і активну спрямованість на зниження споживання пального; розробку програм модифікації та переобладнання суден; підвищення ефективності експлуатації; впровадження енергоефективних і декарбонізаційних технологій і обладнання; просування зеленого ресайклінгу суден; удосконалення системи очищення баластних вод; підтримку досліджень, фінансування, розробку та впровадження судових засобів для підвищення енергоефективності суден. Інтеграція екологічних критеріїв у стратегічне управління підприємством допомагає забезпечити баланс між досягненням прибутку та збереженням природи, покращенням життя співробітників та дотриманням високих стандартів корпоративної відповідальності.

Ключові слова: екологічні критерії, сталий розвиток, парникові гази, викиди, транспортна та логістична інфраструктура, морський транспорт, судноплавство, стратегічний менеджмент, зелені інвестиції.

Introduction. Climatic and environmental challenges are causing structural changes in the world economy. Increased focus and pressure from investors, regulators, employees and other stakeholders make ecological aspects of environmental, social and governance (ESG) criteria for assessing business an important issue for strategic management of shipping and logistics companies, as well as transport logistic infrastructure in general.

Formulation of the problem. Sea transport companies use different environmental criteria for strategy development, which makes it important to develop a universal structure of environmental criteria of sustainable development of shipping and logistics companies for use in strategic management. An important role in solving environmental problems in the shipping industry is the ability to attract investments for these purposes, so it is necessary to explore new approaches to investing in environmental projects in the shipping industry.

Analysis of recent research and publications. Climate and environmental challenges are recognized by the European Central Bank as the two main risk factors [1]. According to the Bank for International Settlements, they are one of the sources of systemic financial risks and may become the cause of the next global financial crisis [2]. In the scientific monograph by P. Matos [3] the main forces driving ESG investing and the role of institutional investors were investigated.

In the article by A. Jägerbrand et. al [4] the environmental impact of the shipping industry was investigated, the effects of water transport on water and coastal ecosystems were summarized, and the increase in the number of chemicals transported by water was analyzed. The authors believe that environmental consequences and potential synergistic effects should be taken into account when planning. Modern technologies and environmental practices that reduce the impact on the environment were examined

in [5], in particular, the limitation established from January 1, 2020 by the IMO, which is responsible for regulating maritime transport. This means that carbon dioxide and sulfur emissions from ships should be reduced from 3.5% to 0.5%. The new rule will reduce sulfur emissions by about 77%, which is equivalent to about 8.5 million tons of sulfur dioxide, in addition to the residues generated from its combustion. In the article by Gerliand T. [6] the expediency of forming the environmental competence of shipmasters, affecting the state of sea waters and protection against pollution, for the sustainable development of shipping companies is substantiated.

To face climate challenges and achieve a sustainable future, countries are guided by global agreements: the United Nations Framework Convention on Climate Change (1992) [7] and the Paris Agreements. In 2015, in Paris, representatives of 195 countries (Ukraine among them) approved the UN Agenda for Sustainable Development until 2030 [8] and the Paris Agreement on climate change [9], where it is stated that one of the three ways of confronting climate threats in the context of sustainable development is to ensure the consistency of financial flows with the direction of low-carbon and climate change-resistant development. In March 2021, the Cabinet of Ministers of Ukraine approved the National Economic Strategy for the period until 2030 [10], according to which the country plans to achieve climate neutrality no later than 2060.

Formulation of the goals of the article. The goals of the article are improvement of the methodological and methodical foundations of the development of the corporate strategy of sea transport companies taking into account the environmental criteria of sustainable development, on the base of the analysis of practical experience of shipping and logistics companies, and investigate new approach for investing in projects related to solving environmental problems in the shipping industry.

Presentation of the main research material. ESG reporting is an important tool for shipping companies to secure access to capital and the future of their business. According to Deloitte, many of them are missing opportunities to improve their chances of attracting financing [11]. A study of 38 shipping companies found that only 63% publish their ESG reports (Figure 1).

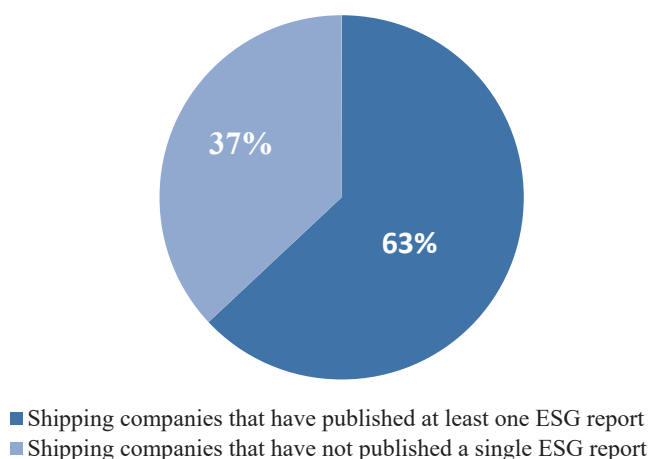


Fig. 1. Statistics of ESG reporting publications by shipping companies, 2023

For a deeper understanding of the concept of the implementation of ESG factors to ensure the sustainable development of companies in the maritime transport sector, the strategies and goals of well-known global transport companies, in particular, A.P. Moller – Maersk, Kawasaki Kisen Kaisha LTD and Höegh Autoliners, were considered.

In 2022 Maersk had share of ocean freight transported with green fuels: 2%; carbon intensity (ocean) increased by 7% compared to 2020 baseline; reduction of emissions in terminals 5.4% since 2021 [12]. Maersk will deliver on their customer commitment to decarbonize their supply chains in time. Strategic targets are for end of year: 2030: aligned with the Science Based Targets initiative 1.5°C pathway; industry-leading green customer offerings across the supply chain; 2040: net zero across the business; 100% green solutions to customers.

The purposes in the field of environmental protection in Vision 2050 of Kawasaki Kisen Kaisha, Ltd shipping company (“K” Line) include transition to low-carbon activity for 2030: reduction of CO₂ emissions by 50% compared to the level of 2008; support for the development of a low-carbon society; transportation and supply of new energy for a low-carbon society; decarbonization “K” Line for 2050: the challenge of achieving zero greenhouse gas (GHG) emissions; support for the decarbonization of society; to be a transporter and supplier of new energy.

Components of risk and opportunity management system of “K” Line in the field of environmental protection include the following [13]. In the field of equipment and technologies: installation of energy-saving equipment to increase shipping efficiency; launching vessels with low-carbon or decarbonized new fuels and propulsion technologies; improving the hull of ships to achieve greater physical strength.

In the field of safety and trainings; improving digital and automated technologies to ensure security and improve operational efficiency; raising the awareness of employees and conducting training on the use of new technologies; building a corporate structure capable of flexibly responding to needs.

In the field of business activities: development of new businesses for energy supply and transportation; fleet preparation for new transportation technologies; increasing the capacity of green recycling of ships; participation in the collection and research of marine plastic pollution; expanding dialogue with administrators responsible for improving port facilities, roads and infrastructure; expanding participation in policy-making with governments, the UN and NGOs.

Höegh Autoliners (global provider of ocean transportation services within the RoRo segment) uses biofuel that reduces emissions compared to traditional fuels: Well-to-Wake (WTW) reduction: biofuel provides an 85% reduction in carbon dioxide equivalent (CO₂e) emissions compared to conventional fuels; Tank-to-Wake (TTW) reduction: biofuel virtually achieves a 100% reduction in CO₂e emissions [14].

Financial tools for solving environmental problems play an important role in shipping taking into account high capital intensity of the industry. The Poseidon Principles are widely recognized by the largest financial institutions in the shipping industry and reflect environmental criteria. The Poseidon Principles Association was formed in 2019. Signatories to the Principles automatically become members of the Poseidon Principles Association [15]. The four basic Poseidon Principles are shown in figure 2.

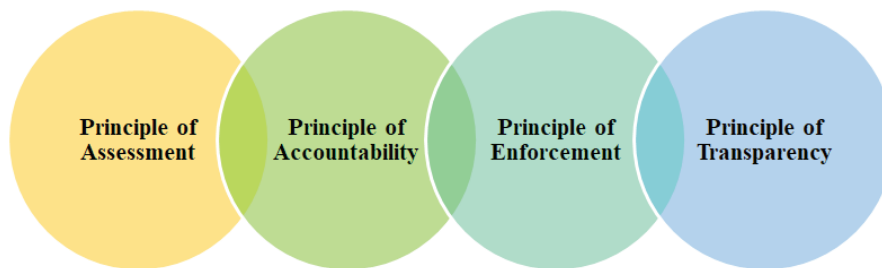


Fig. 2. The four basic Poseidon Principles

The Principles are consistent with the policies and ambitions the IMO, including its revised 2023 GHG Strategy which aims for net-zero emissions from international shipping by 2050. The members of the association measure the concentrations of carbon emissions to determine whether they meet the global goals of reducing such emissions (Principle of Assessment). The members undertake to use means and tools approved by bodies such as the IMO to carry out the necessary assessments (Principle of Accountability). The members carefully describe the objectives set in the loan agreements so that they can be more accurately measured (Principle of Enforcement). The members publicly commit to these principles, monitor and report the results of the annual assessment of their maritime portfolios to the Poseidon Principles General Secretariat and publish these reports on an annual basis (Principle of Transparency).

The Poseidon Principles are applicable to lenders, lessors, and financial guarantors globally. Currently, 34 financial institutions are members of Association, representing a bank loan portfolio to global shipping of over 80% of the global ship finance portfolio [15]. The members commit to implement the Poseidon Principles in their internal policies and standards and to work in partnership with their clients.

A new tool for investing in projects related to solving ecological problems in the shipping industry has emerged recently. Japan shipping company Mitsui O.S.K. Lines (MOL) has announced that it will issue “blue bonds” (5-year duration) through a public offering in Japan’s domestic market in 2024 [16]. A blue bond is a type of green bond issued to finance green projects that aim to solve environmental problems – prevention of marine pollution, sustainable marine resources, and so on. The bonds are the world’s first blue bonds in the shipping industry. The bonds received the highest rating of “Blue 1(F)” from the Japan Credit Rating Agency (JCR) based on its expectation that they will have a positive environmental impact. The company set a total of 650 billion yen to be invested in resolving environmental issues over the three years from FY2023 to FY2025 [16]. Taking into consideration the capital intensity of projects related to solving environmental problems in shipping, attracting financing based on long-term bond loans is a promising method of debt financing. It will raise funds to finance these initiatives.

The universal structure of environmental criteria of sustainable development for transport and logistics companies, built on the base of analysis the experience of considered companies, should include following (figure 3).

- 1. Establishment of principles of environmental policy, development of plans, periodic reviews of intermediate goals in accordance with dynamic changes in the situation*
- 2. Creation of the Environmental Management System*
- 3. Establishing periods for achieving goals in accordance with the requirements of international organizations and state legislation*
- 4. A commitment to use only fuel that meets standards and an active focus on reducing fuel consumption*
- 5. Development and implementation of programs for hull modifications and conversion of ships*
- 6. Improvement of operational efficiency*
- 7. Energy-efficient and decarbonization technologies and equipment.*
- 8. Promoting a recycling-based society using the 3R concept (reduce, reuse and recycle), including ship recycling. Green recycling (the commitment to green and responsible recycling of ships is based on the Hong Kong International Convention on the Safe and Environmental Recycling of Ships (IMO) 2009)*
- 9. Development the ballast water treatment systems (BWTS) that minimize the risk of spreading harmful organisms between sea regions*
- 10. Support for research, financing, development and implementation of ship facilities to increase the energy efficiency of ships, which leads to a reduction of greenhouse gas emissions and prevention of atmospheric pollution*

Fig. 3. The universal structure of environment criteria of sustainable development for transport and logistics companies

Conclusions. The main environmental factors for shipping and logistics companies include reduction of emissions, sewage treatment system, decarbonization of supply chains, green fuels and ship recycling issues.

The Poseidon Principles are widely recognized by the largest financial institutions in the shipping industry and reflect environmental factors. The practical benefit of the Principles is that all signatory organizations must annually measure their emissions and publish the results, indicating the degree of compliance of specific measures with the strategic commitment to gradually reduce gas emissions. To finance projects related

to solving environmental problems, it is advisable to attract long-term investments by issuing green corporate bonds with a specific purpose.

The universal structure of environment criteria of sustainable development for shipping and logistics companies should include establishment of principles of environmental policy, plans, periodic reviews of intermediate goals in accordance with dynamic changes in the situation, creation of the Environmental Management System; establishing periods for achieving goals in accordance with the requirements of international organizations and state legislation; a commitment to use only fuel that meets standards and an active focus on reducing fuel consumption; development and implementation of programs for hull modifications and conversion of ships; improvement of operational efficiency; energy-efficient and decarbonization technologies and equipment; promoting a recycling-based society using the 3R concept, including green recycling of ships; development ballast water treatment systems that minimize the risk of spreading harmful organisms between sea regions; support for research, financing, development and implementation of ship facilities to increase the energy efficiency of ships, which leads to a reduction of greenhouse gas emissions and prevention of atmospheric pollution.

Ecological aspects have a significant impact on achieving business sustainability, and play an important role in establishing relationships with investors, consumers, government bodies and the public. Their integration into the strategy and management of sea transport companies helps ensure a balance between achieving profit and preserving nature, improving the lives of employees and meeting high standards of corporate responsibility. The implementation of environmental criteria in the strategic management of shipping and logistics companies marks a significant step towards creating a more sustainable and ethical industry, which determines further development and improvement in this area.

REFERENCES

1. European Central Bank: Guide on climate-related and environmental risks (November 2020). Retrieved from <http://surl.li/impixa>
2. Bank for International Settlements 2020: The green swan. Central banking and financial stability in the age of climate change. Retrieved from <https://www.bis.org/publ/othp31.pdf>
3. Matos P. (2020). ESG and Responsible Institutional Investing Around the World. A Critical Review. CFA Institute Research Foundation. 82 p. Retrieved from <http://surl.li/bigiou>
4. Jägerbrand A., Brutemark A., Barthel Svedén J. & Gren I.M. (2019). A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. *Science of The Total Environment*. 695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133637>
5. ESG in transportation: much more than a trend. *Asia Shipping*. June 30, 2023. Retrieved from <https://www.asiashipping.co/en/blog/esg-in-transportation-much-more-than-a-trend>
6. Gerliand T. (2024). Ecological competence of ship operators in the context of sustainable development. *Professional Pedagogics*. 1(28). 152–158. DOI: <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2024.28.152-158>

7. United Nations Framework Convention on Climate Change (1992). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text
8. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the UN General Assembly (2015). Retrieved from <https://sdgs.un.org/2030agenda>
9. Paris Agreement on Climate Change. – UN (2015). Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
10. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 179, March 3, 2021: National Economic Strategy for the period until 2030. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>
11. Deloitte Certified Public Accountants Societe: ESG in the Shipping sector (2021). The role of ESG in the evaluation of shipping companies. Retrieved from <http://surl.li/tsvdm>
12. Maersk Annual Report 2022. Retrieved from <http://surl.li/tsvin>
13. “K” LINE Group official site. Retrieved from <https://www.kline.co.jp/en/index.html>
14. HöeghAutoliners official site. Retrieved from <https://www.hoeghautoliners.com/biofuel>
15. Poseidon Principles “A global framework for responsible ship finance”, April 2023. Retrieved from <http://surl.li/tsvdr>
16. MOL to Become World's 1st Shipping Company to Issue Blue Bonds. Mitsui O.S.K. Line Group official site. December 15, 2023. Retrieved from <https://www.mol.co.jp/en/pr/2023/23150.html>

BIBLIOGRAPHY

1. European Central Bank: Guide on climate-related and environmental risks. November 2020. URL: <http://surl.li/impixa>
2. Bank for International Settlements 2020: The green swan. Central banking and financial stability in the age of climate change. 2020. URL: <https://www.bis.org/publ/othp31.pdf>
3. Matos P. ESG and Responsible Institutional Investing Around the World. A Critical Review. CFA Institute Research Foundation, 2020. 82 p. URL: <http://surl.li/bigiou>
4. Jägerbrand A., Brutemark A., Barthel Svedén J., Gren I.M. A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. Science of The Total Environment. 2019. 695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133637>
5. ESG in transportation: much more than a trend. Asia Shipping. June 30, 2023. URL: <https://www.asiashipping.co/en/blog/esg-in-transportation-much-more-than-a-trend>
6. Gerliand T. Ecological competence of ship operators in the context of sustainable development. Professional Pedagogics. 2024. 1(28). Pp. 152-158. DOI: <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2024.28.152-158>
7. United Nations Framework Convention on Climate Change. 1992. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text

8. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the UN General Assembly. 2015. Retrieved from <https://sdgs.un.org/2030agenda>
9. Paris Agreement on Climate Change. – UN. 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
10. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 179, March 3, 2021: National Economic Strategy for the period until 2030. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>
11. Deloitte Certified Public Accountants Societe: ESG in the Shipping sector. The role of ESG in the evaluation of shipping companies. 2021. URL: <http://surl.li/tsvdm>
12. Maersk Annual Report 2022. URL: <http://surl.li/tsvin>
13. “K” LINE Group official site. URL: <https://www.kline.co.jp/en/index.html>
14. Höegh Autoliners official site. URL: <https://www.hoeghautoliners.com/biofuel>
15. Poseidon Principles “A global framework for responsible ship finance”, April 2023. URL: <http://surl.li/tsvdr>
16. MOL to Become World's 1st Shipping Company to Issue Blue Bonds. Mitsui O.S.K. Line Group official site. December 15, 2023. URL: <https://www.mol.co.jp/en/pr/2023/23150.html>

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.45

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.03>

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА У РАЗІ ЙОГО ЗАКРІПЛЕННЯ В НАПІВВАГОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПНЕВМООБОЛОНОК

А.О. Ловська¹, А.О. Мурад'ян², П.В. Рукавішников³, О.В. Демидюков⁴

¹д.т.н., професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²к.т.н., доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6488-6627

³старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів
та енергетичного менеджменту,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9670-3071

⁴аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Анотація

Вступ. Забезпечення ефективності роботи залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку транспортної галузі зумовлює необхідність удосконалення комбінованих систем. Найбільш актуальними серед таких натеper є контейнерні перевезення. Перевезення контейнерів залізницею здійснюється на вагонах-платформах. Нестача вагонів-платформ в експлуатації спричиняє необхідність використання інших типів вагонів під контейнерні перевезення, наприклад напіввагонів. Однак використання напіввагонів для перевезення контейнерів потребує надійної схеми їх взаємодії, яка б забезпечувала нерухомість контейнерів під час транспортування.

Мета. Визначення навантаженості контейнера у разі його закріплення в напіввагоні за допомогою пневмооболонок.

Результати. Для забезпечення нерухомості контейнерів у повздовжній площині використовуються пневмооболонки, які встановлюються між торцевою стіною напіввагона та контейнером.

З метою дослідження ефективності застосування пневмооболонок для кріплення контейнерів у напіввагоні проведено математичне моделювання. Встановлено, що для дотримання прискорень контейнера в межах 20 м/с^2 , жорсткість пневмооболонки повинна становити не менше 2500 кН/м . Проведено розрахунок на міцність контейнера з урахуванням сприйняття ним

навантаження від пневмооболонки. Результати розрахунку показали, що максимальні напруження виникають у середній частині бокової балки і становлять 326,4 МПа. Максимальні переміщення в торцевій стіні зафіксовано за її центром, і вони дорівнюють 3,8 мм. Результати проведеного розрахунку дозволяють зробити висновок, що міцність контейнера при завданих навантаженнях не забезпечується. Тому необхідним є удосконалення схеми закріплення контейнерів у напіввагоні.

Висновки. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації залізничних перевезень.

Ключові слова: транспортна механіка, контейнер, динамічна навантаженість, міцність контейнера, контейнерні перевезення.

DETERMINING THE LOAD OF THE CONTAINER WHEN IT IS FIXED IN AN OPEN WAGON USING PNEUMATIC SHELLS

A.O. Lovska¹, A.O. Muradian², P.V. Rukavishnikov³, O.V. Demydiakov⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Port Operation and Cargo Handling Technology, Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-6488-6627

³Senior Lecturer at the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-9670-3071

⁴Graduate student at the Department of port operation and cargo handling technology, Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Summary

Introduction. Ensuring the efficiency of railway transport at the current stage of development of the transport industry necessitates the improvement of combined systems. Container transport is the most relevant among them today. Containers are transported by rail on flat wagons. The shortage of flat wagons in operation necessitates the use of other types of wagons for container transport, such as open wagons. However, the use of open wagons for container transport requires a reliable scheme of their interaction that would ensure the immobility of containers during transportation.

Purpose. Determining the load of a container when it is fixed in an open wagon using pneumatic shells.

Results. To ensure the containers' longitudinal stability, pneumatic shells used, which are installed between the end wall of the open wagon and the container.

Mathematical modelling was carried out to investigate the effectiveness of using pneumatic shells for fixed containers in an open wagon. It is established that in order to keep the container accelerations within 20 m/s², the stiffness of the pneumatic

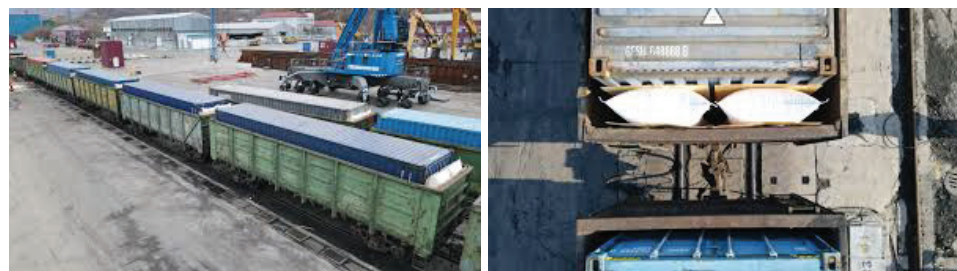
shell should be at least 2500 kN/m. The strength of the container was calculated taking into account the load perception from the pneumatic shell. The calculation results showed that the maximum stresses occurred in the middle part of the side beam and amounted to 326.4 MPa. The maximum displacements in the end wall were recorded at its centre and were equal to 3.8 mm. The results of the calculation allow us to conclude that the strength of the container under the applied loads is not ensured. Therefore, it is necessary to improve the scheme for securing containers in an open wagon.

Conclusions. The research will contribute to the development of recommendations for improving the efficiency of rail transport operations.

Key words: transport mechanics, container, dynamic load, container strength, container transportations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Підвищення ефективності експлуатації транспортної галузі зумовило впровадження модульних транспортних засобів. Одним із найбільш поширених серед таких в експлуатації є контейнери. Це пояснюється можливістю їх перевезень майже всіма видами транспорту: залізничним, автомобільним, водним та авіаційним. Суттєва частка контейнерних перевезень припадає на залізничний транспорт. Перевезення контейнерів залізницею здійснюється на вагонах-платформах. Нестача вагонів-платформ в експлуатації спричиняє необхідність використання інших типів вагонів під контейнерні перевезення, наприклад напіввагонів. Разом із цим використання напіввагонів для перевезення контейнерів потребує надійної схеми їх взаємодії, яка б забезпечувала їх нерухомість під час транспортування.

Для забезпечення нерухомості контейнерів у повздовжній площині використовують пневмооболонки, які встановлюються між торцевою стіною напіввагона та контейнером (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Кріплення контейнера в напіввагоні за допомогою пневмооболонки:
а) вид збоку; б) вид зверху

Зазвичай такі пневмооболонки мають стандартні розміри і характеристики. Наприклад, можуть застосовуватися пневмооболонки розміром 900x1200 мм (рис. 2).



Рис. 2. Пневмооболонка для кріплення вантажів у вагонах

Для дослідження ефективності застосування пневмооболонок для кріплення контейнерів у напіввагоні необхідним є визначення їх навантаженості в умовах експлуатаційних режимів. Тому дослідження, присвячені визначенню навантаженості контейнера у разі його закріплення в напіввагоні за допомогою пневмооболонок, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Питанню перевезень контейнерів залізничним транспортом присвячено чимало публікацій. Так, аналіз основних показників міцності несучої конструкції напіввагона під час перевезення в ньому контейнерів висвітлюється у публікації [1]. При цьому досліджено повздовжню динаміку напіввагона, завантаженого двома контейнерами. Враховано, що їх взаємодія здійснюється через фітингові упори, які приварені до підлоги напіввагона. Проведені розрахунки показали, що перевезення контейнерів з використанням зазначеної схеми закріплення є допустимим. Однак в умовах наднормових режимів така схема закріплення є неефективною.

У роботі [2] для адаптації транспортних засобів до перевезень контейнерів запропоновано конструкцію зйомного модуля типу FLAT RACK. Наведено результати розрахунку зйомного модуля на міцність за умови його використання на вагоні-платформі. Результати розрахунку довели доцільність запропонованої конструкції зйомного модуля. Разом із цим авторами не досліджувалась можливість його використання для кріплення контейнерів у напіввагонах.

Особливості модернізації несучої конструкції вагона для можливості перевезень на ньому контейнерів висвітлюються в роботі [3]. Авторським колективом наведено результати експериментальних досліджень міцності рами вагона при маневровому співударянні. Встановлено, що запропонована модернізація є доцільною.

Особливості модернізації вантажного вагона для перевезень контейнерів висвітлено у статті [4]. Авторами запропоновано використання зйомної рами

для розміщення 20-ти та 40-футових контейнерів. Доведено, що запропоновані рішення щодо використання такої рами є ефективними. Однак дослідження [3; 4] проведені на прикладі вагона-платформи.

У роботі [5] наведено рішення щодо ситуаційної адаптації напіввагонів до перевезень контейнерів. Запропоновано спеціальний зйомний модуль для закріплення контейнерів у напіввагоні. Однак авторами не приділялася увага дослідженню міцності несучої конструкції напіввагона та контейнера з урахуванням використання такого модуля.

У статті [6] висвітлюються особливості розрахунку на міцність підлоги 40-футового контейнера у разі його перевезення водним транспортом. Запропоновані рекомендації щодо безпечної експлуатації даного типу контейнера. Однак ці рішення не є ефективними у разі його перевезення залізничним транспортом, зокрема в напіввагонах.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що питання навантаженості контейнерів у разі перевезення залізничним транспортом є досить актуальними, однак вони потребують подальшого дослідження.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Визначення навантаженості контейнера при його закріпленні в напіввагоні за допомогою пневмооболонки. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести математичне моделювання повздовжньої навантаженості контейнера, розміщеного в напіввагоні;
- розрахувати на міцність контейнер у разі його закріплення в напіввагоні за допомогою пневмооболонки.

Об'єктом дослідження є контейнер типорозміру 1СС.

Предмет дослідження – навантаженість контейнера у разі його закріплення в напіввагоні за допомогою пневмооболонки.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для визначення ефективності застосування пневмооболонки для кріплення контейнерів у напіввагоні проведено математичне моделювання. Для цього використано математичну модель (1) [7]. Модель характеризує навантаженість контейнера в повздовжній площині, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні.

У рамках даного дослідження зазначену модель було доопрацьовано шляхом урахування сили від пневмооболонки на контейнер. Прийнято припущення, що пневмооболонка повністю розподілена відносно торцевої стіни контейнера. Враховано, що обпирання контейнера та його кріплення в напіввагоні здійснюється через фітинги, які взаємодіють з фітинговими упорами. За рахунок наявності технологічного зазору виникають сили тертя між горизонтальними поверхнями фітингів та фітингових упорів. Контейнер завантажений умовним вантажем із використанням повної вантажопідйомності. Переміщення вантажу в контейнері до уваги не бралось. Зазор між пневмооболонкою та стінкою контейнера відсутній. Попереднє статичне стиснення пневмооболонки в моделі не враховувалося. Розрахункова схема напіввагона, завантаженого контейнерами, наведена на рис. 3. На цій схемі пневмооболонки позначено сірим кольором.

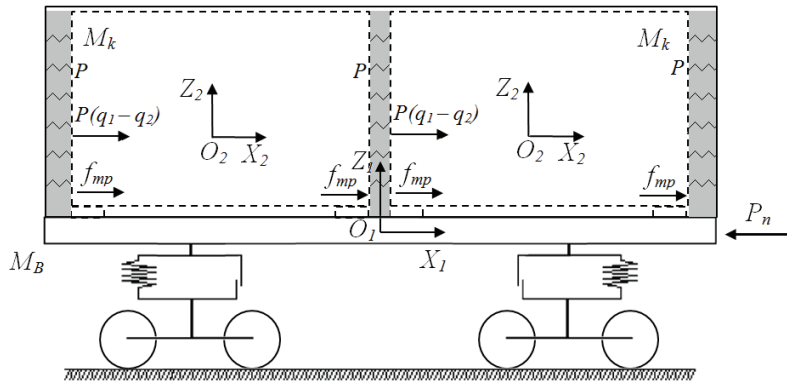


Рис. 3. Розрахункова схема напіввагона, завантаженого контейнерами

Математична модель, яка описує динамічну навантаженість контейнера при перевезенні його в напіввагоні має вигляд:

$$\begin{cases} M_{пв} \cdot \ddot{q}_1 = P_n - \sum_{i=1}^n (f_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + P \cdot (q_1 - q_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (f_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + P \cdot (q_1 - q_2)), \end{cases} \quad (1)$$

де M_B – маса-брутто напіввагона; P_n – величина повздовжньої сили, що діє на автозчеп; f_{mp} – сила тертя між фітинговими упорами та фітингами; M_k – маса контейнера; P – жорсткість пневмооболонки; q_1, q_2 – відповідно узагальнені переміщення напіввагона та контейнера.

Розв’язок даної системи рівнянь здійснено у MathCad [8; 9] при початкових умовах (швидкостях та прискореннях), близьких до нуля [10]. Результати розрахунку свідчать, що для дотримання прискорень контейнера в межах 20 м/с^2 жорсткість пневмооболонки повинна становити не менше 2500 кН/м (рис. 4).

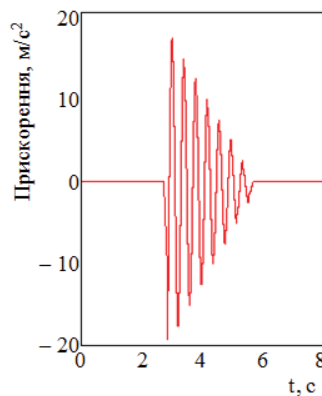


Рис. 4. Прискорення, які діють на контейнер

Важливо сказати, що в умовах наднормових режимів експлуатації дана величина жорсткості повинна мати ще більше значення.

Для визначення міцності контейнера з урахуванням закріплення його за допомогою пневмооболонки у напіввагоні проведено розрахунок у SolidWorks Simulation [11; 12]. Розрахункову схему контейнера наведено на рис. 5.

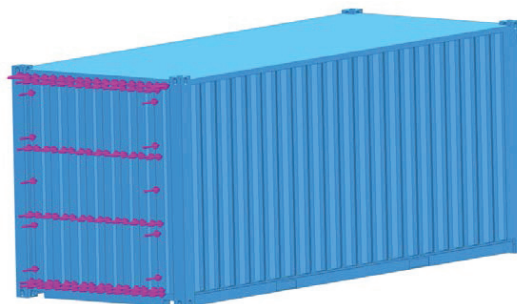


Рис. 5. Розрахункова схема контейнера

Враховано, що на торцеву стіну діє навантаження від пневмооболонки, яке рівномірно розподілене за її площею (2,591x2,438 м). Контейнер знаходиться у завантаженому стані з використанням повної вантажопідйомності. Закріплення контейнера відбувалося за допомогою фітингових упор. Матеріал конструкції – сталь 09Г2С [13].

Скінчено-елементна модель контейнера утворена тетраедрами. Їх оптимальну чисельність визначено графоаналітично [14]. При цьому модель налічує 123391 елемент та 40050 вузлів. Максимальний розмір елемента скінчено-елементної моделі склав 120 мм, а мінімальний – 24 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 6, 7.

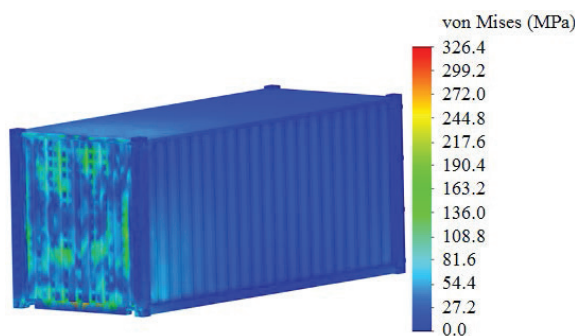


Рис. 6. Напружений стан контейнера

Максимальні напруження в контейнері зафіксовано в середній частині бокової балки, вони склали 326,4 МПа. В обшивці торцевої стіни ці напруження склали близько 290 МПа. Максимальні переміщення в торцевій стіні виникають за її центром і дорівнюють 3,8 мм. Результати проведеного розрахунку дозволяють зробити висновок, що міцність контейнера при завданих навантаженнях не забезпечується.

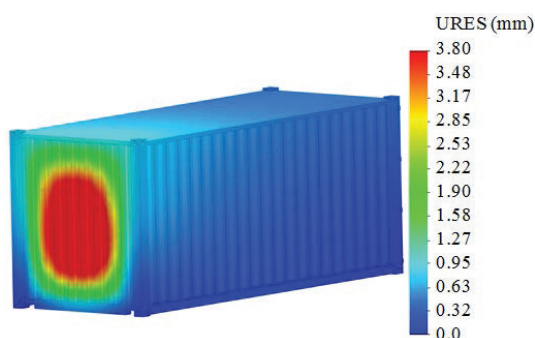


Рис. 7. Переміщення в контейнері

Висновки і перспектива подальшої роботи в цьому напрямі. 1. Проведено математичне моделювання повздовжньої навантаженості контейнера, розміщеного в напіввагоні. Встановлено, що для дотримання прискорень контейнера в межах 20 м/с^2 жорсткість пневмооболонки повинна становити не менше 2500 кН/м . У зв'язку з великою різноманітністю за технічними характеристиками пневмооболонок, визначення тиску повітря, яке відповідає даній величині жорсткості, на даному етапі дослідження не здійснювалося.

2. Розраховано на міцність контейнер у разі його закріплення в напіввагоні за допомогою пневмооболонок. Максимальні напруження виникають у середній частині бокової балки і становлять $326,4 \text{ МПа}$. Максимальні переміщення в торцевій стіні зафіксовано за її центром, і вони дорівнюють $3,8 \text{ мм}$. Результати проведеного розрахунку дозволяють зробити висновок, що міцність контейнера при завданих навантаженнях не забезпечується. Тому питання удосконалення схеми закріплення контейнерів у напіввагонах потребують подальших досліджень.

Подяка. Дана публікація підготовлена у рамках виконання стипендіальної роботи Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук «Ефективні конструктивні рішення залізничного рухомого складу для перевезень стратегічних вантажів» (№ДР 0124U003906).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В., Рукавішников П. В. Особливості визначення показників міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2024. № 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9
2. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(1), 79. DOI: 10.3390/app13010079
3. О. Н. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Наука та прогрес транспорту*.

- Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
4. Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-feet-long containers on an universal platform wagon / V. Shaposhnyk, O. Shykunov, A. Reidemeister, M. Leontii, O. Potapenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1(7 (109)). P. 14–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225090
 5. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation / Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(15), 8605. DOI: 10.3390/app13158605
 6. Arkadiusz Rzeczycki, Bogusz Wisnicki. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90.
 7. Ловська А. О. Визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2019. Вип. 184. С. 6–19.
 8. Богач І. В., Краковецький О. Ю., Килик Л. В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 106 с.
 9. Сясев А. В. Вступ до системи MathCad : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. 108 с.
 10. Lovskaya Alyona. Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 3, Issue 4. P. 36–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.24997
 11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник. Луцьк : Вежа. 2018. 172 с.
 12. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks : навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.
 13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.
 14. Identifying patterns in loading a gondola car body with reinforcing belts in the structure of side walls / Alyona Lovska, Oleksandr Stanovskyi, Oksana Zharova, Yevheniia Naumenko, Yevhen Pelypenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3/7 (129). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.303987

REFERENCES

1. Lovska A. O., Dizo Ya., Rybin A. V. & Rukavishnikov P. V. (2024). Peculiarities of determining the strength indicators of the semi-wagon body when transporting containers in it [Osoblyvosti vyznachennia pokaznykiv mitsnosti kuzova napivvahona pry transportuvanni v nomu konteineriv]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9 [in Ukrainian]

2. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov & Kateryna Kravchenko. (2023). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*, 13(1), 79. DOI: 10.3390/app13010079
3. O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk & O. A. Shykunov. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
4. V. Shaposhnyk, O. Shykunov, A. Reidemeister, M. Leontii & O. Potapenko. (2021). Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7 (109)), 14–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225090
5. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko & Sebastian Solcansky. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*, 13(15), 8605. DOI: 10.3390/app13158605
6. Arkadiusz Rzczycki & Bogusz Wisnicki. (2016). Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*, 252, 81–90.
7. Lovska A. O. (2019). Determination of the load of a container placed on a platform car during the elastic-viscous interaction of fittings with fitting stops [Vyznachennia navantazhenosti konteineru, rozmishchenoho na vahoni-platformi pry pruzhno-viazkii vzaiemodii fitynhiv z fitynhovymy uporamy]. *Collection of scientific works of UkrSURT*, 184, 6–19. [in Ukrainian]
8. Bohach, I. V., Krakovetskyi, O. Yu. & Kylyk, L. V. (2020). Numerical methods for solving differential equations using MathCad: Tutorial [Chyselni metody rozviazannia dyferentsialnykh rivnian zasobamy MathCad: Navchalnyi posibnyk]. Vinnytsia: VNTU. 106 p. [in Ukrainian]
9. Syasev, A. V. (2004). Introduction to the MathCad system: a study guide [Vstup do systemy MathCad: navchalnyi posibnyk]. Dnipropetrovsk: Publishing House of Dnipropetr. University, 108 p. [in Ukrainian]
10. Lovskaya Alyona. (2014). Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 4, 36–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.24997
11. Pustylga, S. I., Samostyan, V. R. & Klak, Y. V. (2018). Engineering graphics in SolidWorks: a tutorial. [Inzhenerna hrafika v SolidWorks: navchalnyi posibnyk]. Lutsk: Tower, 172 p. [in Ukrainian]
12. Kozyar, M. M., Feshchuk, Yu. V. & Parfenyuk O. V. (2018). Computer graphics: SolidWorks: Study guide. [ompiuterna hrafika: SolidWorks: Navchalnyi posibnyk]. Kherson: Oldi-plus, 252 p. [in Ukrainian]
13. DSTU 7598:2014. Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernized 1520 mm gauge wagons

- (non-self-propelled) [Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proiektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh)]. (2015) Kyiv. 2015. 250 p. [in Ukrainian]
14. Alyona Lovska, Oleksandr Stanovskyi, Oksana Zharova, Yevheniia Naumenko & Yevhen Pelypenko. (2024). Identifying patterns in loading a gondola car body with reinforcing belts in the structure of side walls. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/7 (129), 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.303987

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.436:629.128.6

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04>

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРХНЬОЇ МЕРТВОЇ ТОЧКИ ПОРШНЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Р.А. Варбанець¹, Д.С. Мінчев², В.І. Залож³

¹д.т.н., професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

²д.т.н., доцент, професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5960-3063

³к.т.н., доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін,

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Анотація

Вступ. Запропоновано новий підхід до розробки портативної системи параметричної діагностики морських двигунів, що працює в режимі реального часу. Система базується на використанні сучасних Android/iOS гаджетів, які отримують інформацію від датчиків через Bluetooth, а потім виконують необхідні розрахунки та відображають діаграми і дані в реальному часі. У системі, що розробляється, використовується комбінація датчика тиску газів у робочому циліндрі та віброакустичного датчика, що розширює можливості діагностики морських дизелів в умовах експлуатації. Таке рішення дозволяє діагностувати систему впорскування палива, механізм керування клапанами газорозподілу, а також деякі інші системи двигуна. Для розробки портативної системи діагностики морських дизелів насамперед необхідно розв'язати задачу аналітичного визначення верхньої мертвої точки (ВМТ), оскільки така система не передбачає використання для цього спеціальних датчиків. **Мета роботи** – розробка стійкого до шумів аналітичного методу визначення положення ВМТ та синхронізації даних, здатного працювати з неточними вихідними даними при тестуванні морських дизелів під час експлуатації. **Результати.** Пропонується алгоритм визначення ВМТ, який базується на аналізі оригінальної діаграми тиску, а не її похідної, що мінімізує вплив цифрових та аналогових шумів. Запропонований алгоритм визначення ВМТ та подальшої синхронізації даних працює за відсутності інформації про фактичний ступінь

стиснення в циліндрі, що характерно для сучасних двигунів зі змінними фазами газорозподілу. Також алгоритм функціонує за умови наявності приблизних даних про тиск наддувеного повітря, який уточнюється в процесі ітерацій. Крім того, запропоновано формулу для визначення початкового положення ВМТ. **Висновки.** Методи обробки даних, що пропонуються у статті, дозволять отримувати точну оцінку індикаторної потужності завдяки точному визначенню ВМТ, а також здійснювати оптимальне налаштування систем двигуна та контролювати результат під час експлуатації. Запропонований підхід до діагностики морських двигунів у режимі реального часу має ряд переваг порівняно з традиційними методами. Він забезпечує більш точний аналіз робочого процесу, підвищує ефективність контролю за якістю згоряння палива та дозволяє мінімізувати викиди шкідливих речовин. Це сприяє виконанню вимог ІМО та відкриває нові можливості для оптимізації роботи морських двигунів, підвищення їхніх експлуатаційних характеристик та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, параметрична діагностика, моніторинг робочого процесу, верхня мертва точка, індикаторна потужність, системи діагностики реального часу, портативні пристрої.

ANALYTICAL METHOD FOR PISTON TOP DEAD CENTER DETERMINATION IN A PARAMETRIC DIAGNOSTIC SYSTEM FOR MARINE DIESEL ENGINES

R.A. Varbanets¹, D.S. Minchev², V.I. Zalozh³

¹Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department
«Marine Power Plants and Technical Maintenance»,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

²Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Professor at the Department
«Marine Power Plants and Technical Maintenance»,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5960-3063

³PhD, Associated Professor at the Department «Engineering Sciences»,
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Summary

Introduction. A novel approach to developing a portable real-time parametric diagnostic system for marine engines is proposed. The system leverages modern Android/iOS devices, which receive data from sensors via Bluetooth, perform necessary calculations, and display diagrams and data in real-time. The system under development employs a combination of a gas pressure sensor in the working cylinder and a vibroacoustic sensor, expanding the diagnostic capabilities of marine diesel engines during operation. This solution enables the diagnosis of the fuel injection system, valve timing mechanism, and other engine systems.

The objective of this work is to develop a noise-resistant analytical method for determining the Top Dead Center (TDC) position and data synchronization, capable of operating with imprecise input data when testing marine diesel engines during operation. To achieve this, it is crucial to solve the problem of analytical TDC determination, as

the system does not use specialized sensors for this purpose. **Results.** An algorithm for TDC determination is proposed, based on the analysis of the original pressure diagram rather than its derivative, minimizing the impact of digital and analog noise. The proposed algorithm for TDC determination and subsequent data synchronization operates without information about the actual compression ratio in the cylinder, which is characteristic of modern engines with variable valve timing. The algorithm also functions with approximate data on charge air pressure, which is refined through iterations. Additionally, a formula for determining the initial TDC position is proposed.

Conclusions. The data processing methods presented in this article allow for accurate estimation of indicated power through precise TDC determination, as well as optimal adjustment of engine systems and result monitoring during operation. The proposed approach to real-time marine engine diagnostics offers several advantages over traditional methods. It provides more accurate analysis of the working process, improves control over fuel combustion quality, and helps minimize harmful emissions. This contributes to meeting IMO requirements and opens new possibilities for optimizing marine engine operation, improving their performance characteristics, and reducing negative environmental impact.

Key words: marine diesel engine, parametric diagnostics, working process monitoring, top dead center, indicated power, real-time diagnostic systems, portable devices.

Вступ. Міжнародна морська організація (ІМО) запровадила жорсткі обмеження щодо викидів токсичних сполук в атмосферу під час роботи морських двигунів, ставлячи амбітну мету декарбонізації морського сектору [1]. Ці вимоги спонукали до широкомасштабного впровадження інноваційних рішень у морській галузі. Зокрема, значного поширення набуло використання низькосірчистих та альтернативних видів палива [2], а також реалізація комплексу заходів, спрямованих на суттєве підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок.

У контексті цих глобальних змін особливої актуальності набуває завдання підвищення ефективності моніторингу та діагностики робочого процесу морських двигунів. Це завдання є ключовим для забезпечення ефективного контролю за якістю згоряння палива в циліндрах та мінімізації викидів шкідливих речовин під час експлуатації суден. Такий підхід не лише сприяє виконанню вимог ІМО, але й відкриває нові можливості для оптимізації роботи морських двигунів, підвищення їхніх експлуатаційних характеристик та зниження негативного впливу на навколишнє середовище [3].

Постановка проблеми. Перед авторами постало завдання створення системи діагностики морських дизелів, що функціонує в режимі реального часу. Це потребувало розробки інноваційних алгоритмів для синхронізації та обробки даних.

Ключовою вимогою стала розробка нового методу визначення верхньої мертвої точки (ВМТ), який би відзначався стійкістю до шумів у вихідних даних. Ця проблема особливо гостро постає при аналізі похідних сигналу тиску, отриманих чисельними методами. Таким чином, виникла необхідність у розробці методу визначення ВМТ, який би не залежав від похідної сигналу тиску, що є особливо актуальним для підвищення точності та надійності діагностики.

Розроблений метод повинен ефективно функціонувати в умовах обмеженої або неточної інформації про тиск наддувного повітря. Ця проблема часто виникає під час експлуатації двигунів, оскільки абсолютні значення тиску наддуву зазвичай невеликі. Внаслідок цього навіть незначні похибки вимірювання можуть призвести до суттєвих відхилень у розрахунках. Тому новий метод має бути стійким до таких неточностей та забезпечувати достовірні результати навіть при неповних вхідних даних.

Розроблюваний метод повинен забезпечувати точні результати в умовах змінного фактичного ступеня стиснення в циліндрі. Ця особливість притаманна сучасним двигунам зі змінними фазами газорозподілу, що дозволяє оптимізувати робочий процес залежно від режиму роботи. Крім того, актуальним завданням дослідження є створення алгоритму, здатного швидко та з високою точністю визначити початкове положення ВМТ на основі аналізу часових діаграм тиску. Цей алгоритм має забезпечувати мінімальну початкову похибку, що критично важливо для подальших розрахунків та діагностики двигуна в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язання задачі визначення ВМТ наведено в роботах багатьох авторів [4; 6-11]. Усі автори наводять дані про значний вплив похибки ВМТ на розрахункові параметри двигуна. У роботі [6] професор Stanisław Polanowski оцінює вплив похибки $\pm 0,3$ °ПКВ у визначенні положення ВМТ на розрахункову величину ступеня стиснення в циліндрі в межах ± 10 %.

У статті [7] Per Tunestal пропонує метод визначення ВМТ на основі термодинамічної моделі газу всередині камери згоряння і наводить дані про вплив похибки ВМТ у діапазоні до 10% / °ПКВ на середній індикаторний тиск *IMEP* та на характеристику тепловиділення в циліндрі. У цій роботі показано, що похибка ВМТ не повинна перевищувати 0,1 °ПКВ.

Emiliano Pipitone та Alberto Vessari в роботі [8] використовували спеціальний ємнісний датчик для оцінки точності визначення ВМТ. Вони показали, що похибка в 1 °ПКВ ВМТ може призвести до похибки розрахунку середнього індикаторного тиску *IMEP* до 10% та похибки до 25% у розрахунку характеристики тепловиділення. У роботі [8] показано, що положення колінчастого вала (а отже, і об'єм всередині циліндра) має бути відомим з точністю до 0,1 °ПКВ, що є непростим завданням.

Термодинамічні методи визначення ВМТ обговорювалися в роботах Marek J. Staś [9], M. Tazerout, O. Le Corre, S. Rousseau [10], P. Варбанця [11]. Усі автори вказують на важливість точного визначення ВМТ (0,1 .. 0,3 °ПКВ) та значний вплив похибки ВМТ на розрахунок потужності: 6...10 % / °ПКВ.

Мета роботи – розробка стійкого до шумів аналітичного методу визначення положення ВМТ та синхронізації даних, здатного працювати з неточними вихідними даними при тестуванні морських дизелів під час експлуатації.

Концепція системи діагностування реального часу із застосуванням сучасних та перспективних технологій. Застосування алгоритмів та методів розрахунку ВМТ, запропонованих у цій статті, допоможуть, на думку авторів, у реальному часі вирішити проблему визначення ВМТ та подальшого визначення параметрів робочого процесу. Методи передбачають аналіз кількох послідовних циклів двигуна, тому виведення розрахункових параметрів та діаграм

відбувається з деякою затримкою – у псевдорежимі реального часу. Такий режим надалі називатиметься «режимом реального часу», і таке припущення можна вважати прийнятним для завдань діагностики морських двигунів під час експлуатації.

Відкладена діагностика або діагностика не в реальному часі передбачає спочатку запис даних на двигуні під час його експлуатації, а потім передачу даних та їх подальший розрахунок і аналіз під *Windows*, *iOS* або *Android*. Така методика діагностики двигунів звільняє від необхідності проводити обробку та аналіз даних безпосередньо під час експлуатації, поруч із працюючим двигуном.

Загалом, у разі діагностики морських дизелів необхідно записувати дані послідовно з усіх циліндрів, намагаючись робити це при однаковому навантаженні та однакових зовнішніх умовах. Усі перераховані вище системи визначають в кінцевому підсумку індикаторну потужність *IPOWER* усього двигуна як суму індикаторних потужностей окремих циліндрів, маючи на увазі, що циліндри були проіндиційовані в однакових умовах експлуатації. При цьому відомо, що навантаження на морі постійно змінюється у зв'язку з хвилюванням та вітром, а також автоматичним включенням споживачів на борту судна, які відповідають за безпеку мореплавства.

Однак завдання діагностики морських двигунів не обмежується лише визначенням середнього індикаторного тиску *MIP*, індикаторної потужності *IPOWER*, максимального тиску згоряння P_{max} тощо. Значно важливішим завданням діагностики є визначення дефектів циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу, системи циліндрового мащення, газотурбоагнітача та інших вузлів двигунів [12].

Запропонована в цій статті концепція діагностики суднових дизелів з використанням датчика тиску газів у циліндрі, додаткового датчика вібрації та бездротової передачі даних здійснює діагностику робочого циклу в реальному часі, рис. 1.

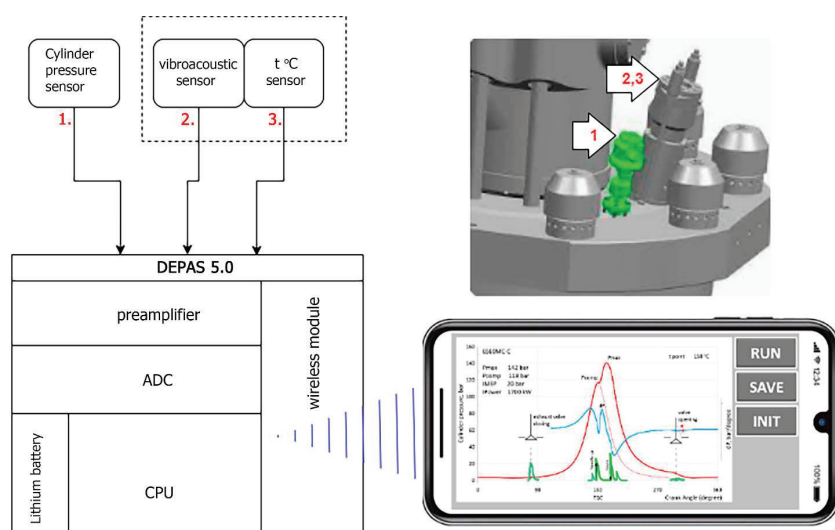


Рис. 1. Система діагностики морських дизельних двигунів реального часу з використанням вібродатчика та бездротової передачі даних

Датчик температури на рис. 1 розглядається як опціональний. Він може бути включений до складу системи діагностування в реальному часі для визначення температур у контрольних точках двигуна.

Розрахунок і відображення індикаторних діаграм та параметрів робочого процесу здійснюється на смартфоні або планшеті з *Android* чи *iOS*, продуктивність яких нині дозволяє виконувати досить складні розрахунки, включаючи *FFT*-фільтрацію даних, розрахунок середнього індикаторного тиску та фазовий аналіз вібродіаграм [13].

Якість відображення графіки у сучасних гаджетах дуже висока – значно вища, ніж на спеціалізованих вбудованих екранах наявних на ринку систем діагностування, що функціонують у режимі відкладеного аналізу.

Використання *Bluetooth* передачі даних також має вирішити багато проблем, пов'язаних із незручністю дротової передачі даних під час індиціювання двигуна. Поява на ринку контролерів із вбудованими модулями *ADC* та бездротової передачі даних дає можливість спроектувати систему діагностики морських двигунів, яка здатна вимірювати та аналізувати дані двигунів з кроком дискретизації $0,1^\circ$ ПКВ (для чотиритактних дизелів) та $0,05^\circ$ ПКВ (для малооберткових двотактних дизелів). Система реального часу призначена для діагностування широкого класу морських двигунів, а також двигунів тепловозів та берегових станцій [14].

Вказані величини кроку дискретизації прийняті наразі більшістю сучасних систем діагностування [15]. Такий крок дискретизації дає можливість більш точної фазової оцінки індикаторних параметрів і, що важливо, оцінки коефіцієнта детонації при згорянні палива в циліндрах шляхом *FFT*-аналізу даних тиску газів $P(deg)$.

Висока продуктивність сучасних мікропроцесорів, висока частота *ADC* (до 500 ksps і вище), вбудований модуль бездротової передачі даних та низьке сумарне споживання дає можливість спроектувати універсальну систему діагностики морських дизелів з автономним живленням, що працює в режимі реального часу, рис. 1.

Ключова перевага запропонованої системи індиціювання та діагностики морських двигунів порівняно з існуючими на ринку аналогами полягає у можливості здійснювати налаштування двигуна в режимі реального часу безпосередньо під час його експлуатації. У реальному часі можливий контроль навантаження циліндрів *IPOWER*, контроль середнього індикаторного тиску *MIP*, основних точок тиску P_{max} , P_{comp} , P_{ign} , а також оцінка нестабільності подачі палива та процесу згоряння палива в робочих циліндрах.

Апаратна частина системи складається з датчика тиску, вібродатчика та опціонального датчика температури, рис. 1. Підсилювачі сигналів датчиків і мікроконтролер розташовані в невеликому боксі, там же знаходяться літєві джерела живлення та контролер заряду. Розрахункова та графічна частини виконані на сучасному смартфоні або планшеті.

Таким чином вирішується важливе завдання експлуатації – зробити контроль робочого процесу морських двигунів доступним широкому колу морських інженерів. Фактично інженер отримує лише необхідний набір датчиків та один вимірювальний блок. Усі розрахунки та відображення діаграм виконує персональний

гаджет, зв'язок з яким здійснюється через *Bluetooth*. Таке рішення мінімізує обсяг апаратної частини та потенційну вартість системи діагностування.

Таблиця 1

Робочі параметри двигуна, що визначаються в режимі реального часу та в режимі аналізу

| | |
|--|---|
| ----- режим швидкого сканування в реальному часі | |
| RPM | Оберти двигуна за хвилину, xv^{-1} |
| $P_{max} (P_z)$ | Максимальний тиск згоряння та відповідний кут колінчастого валу, Bar/ °CA |
| COV_p | Коефіцієнт варіації тиску, % |
| $COVP_{max}$ | Коефіцієнт варіації максимального тиску згоряння, % |
| CI_p | Індекс нерегулярності циклів (тиск), % |
| $\Delta\varphi_{adv}$ | Варіація фаз впорскування палива, °CA |
| $\Delta\varphi_{inj}$ | Варіація тривалості впорскування палива в циліндр, °CA |
| $\Delta\varphi_{valve}$ | Варіація кутів закриття клапанів, °CA |
| ----- режим аналізу | |
| $P_{max} (P_z) corrected$ | Максимальний тиск згоряння при відповідному куті повороту колінчастого валу, Bar/ °CA |
| $P_{comp} (P_c)$ | Тиск кінця стиснення, Bar |
| $IMEP (MIP)$ | Середній індикаторний тиск, Bar |
| $IPOWER (N)$ | Індикаторна потужність циліндра, kW |
| $P_{ignition} (P_{ign})$ | Тиск початку згоряння та відповідний кут колінчастого валу, Bar/ °CA |
| $P_{exp} (P_{36})$ | Тиск при 36° KB після ВМТ, bar |
| $Fuel Injection timing$ | Реальні та геометричні фази впорскування палива, °CA |
| $Valves timing$ | Фази газорозподілу впускних і випускних клапанів, °CA |
| $Fuel ignition delay$ | Час від початку впорскування до початку згоряння, °CA/ms |
| $DeltaG$ | Різниця між реальною та геометричною фазами впорскування палива, °CA |

Аналітичний метод визначення ВМТ поршня шляхом розв'язання рівняння $PV^n = const$. Синхронізація даних, тобто переведення даних тиску в циліндрі з функції часу у функцію за кутом повороту колінчастого валу [3; 10; 11], часто необхідно робити за відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі $\varepsilon = V_a/V_c$, що характерно для сучасних двигунів зі змінними фазами газорозподілу [1]:

$$P(t, ms) \rightarrow P(deg, °CA) \quad (1)$$

де ε – ступінь стиснення в циліндрі; V_a – робочий об'єм циліндра; V_c – об'єм камери стиснення.

Задача аналітичного визначення ВМТ розв'язувалася багатьма авторами [16; 17]. Можна відразу виділити тип дизелів, для яких ця задача розв'язується відносно нескладно, – це малообертові та середньообертові дизелі з початком

самозаймання після ВМТ, рис. 2. У цьому випадку крива швидкості зміни тиску при стисненні $dP/d\varphi$ перетинає нуль у положенні ВМТ (за винятком малого термодинамічного зсуву [3; 4]). Або крива підходить близько до нуля, як показано на рис. 2, і її екстраполююча крива перетинає нуль у положенні ВМТ з дуже малою похибкою екстраполяції.

Двотактні малообертові дизелі широко застосовні на судах морського флоту як головні двигуни, і для них задача аналітичної синхронізації даних (1) розв'язується відносно легко. Інші, також широко застосовні морські двигуни (середньо- та високообертові чотиритактні), мають робочий процес з початком займання в циліндрі перед ВМТ. У цьому випадку крива швидкості зміни тиску $dP/d\varphi$ не перетинає нуль у положенні ВМТ. Екстраполяція цієї кривої за допомогою математичної моделі може давати похибку, пов'язану зі значними шумами, отриманими в результаті чисельного диференціювання кривої тиску [3, 8-15].

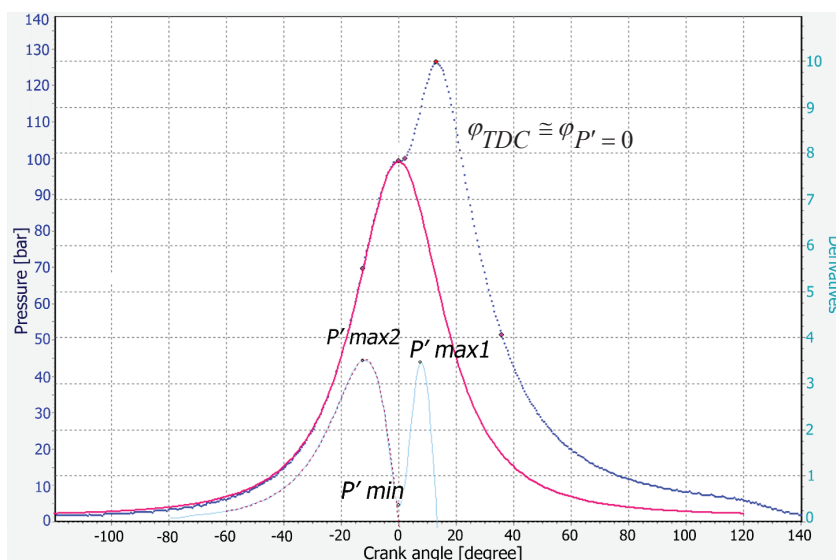


Рис. 2. Робочий процес двотактного малообертового дизеля 6S50MC-C із займанням палива після ВМТ

Визначити ВМТ, а потім розв'язати задачу синхронізації даних (1) пропонується за допомогою аналізу записаної кривої тиску, для якої справедливе рівняння (2). Запропонований нижче метод базується на законі політропного стиснення в циліндрі за умови постійного середнього значення коефіцієнта політропи стиснення n [3, 4]:

$$PV^n = const; \quad (2)$$

де P , V – тиск і об'єм у робочому циліндрі; $n=1.33\dots 1.37$ [3].

Окрім відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення eps , часто буває невідомим або дуже приблизно відомим тиск наддувного повітря P_{scav} . Тиск наддуву має малу абсолютну величину, тому на практиці він вимірюється, як правило, з великою похибкою [10].

Більшість сучасних систем діагностування морських дизелів, призначених для практичного застосування [4; 14; 18; 19], використовують неохолоджувані датчики, які при нагріванні в процесі вимірювання змінюють свій постійний рівень і не призначені для вимірювання постійних тисків, тобто не вимірюють тиск наддувального повітря. При індиціюванні двигуна P_{scav} має вимірюватися незалежним датчиком або задаватися вручну, що незручно під час діагностування. Неточне внесення P_{scav} може суттєво спотворити результати розрахунку і внести похибку в розрахункові значення середнього індикаторного тиску MIP та індикаторної потужності циліндра $IPOWER$.

Таким чином, актуальним є завдання визначення із заданою точністю ВМТ та подальша синхронізація даних (1) при невідомих параметрах ступеня стиснення eps та тиску наддувального повітря P_{scav} . Розв'яжемо це завдання для ділянки $[P_1 \dots P_2]$ на кривій стиснення, див. рис. 3, для якої справедливий вираз (2).

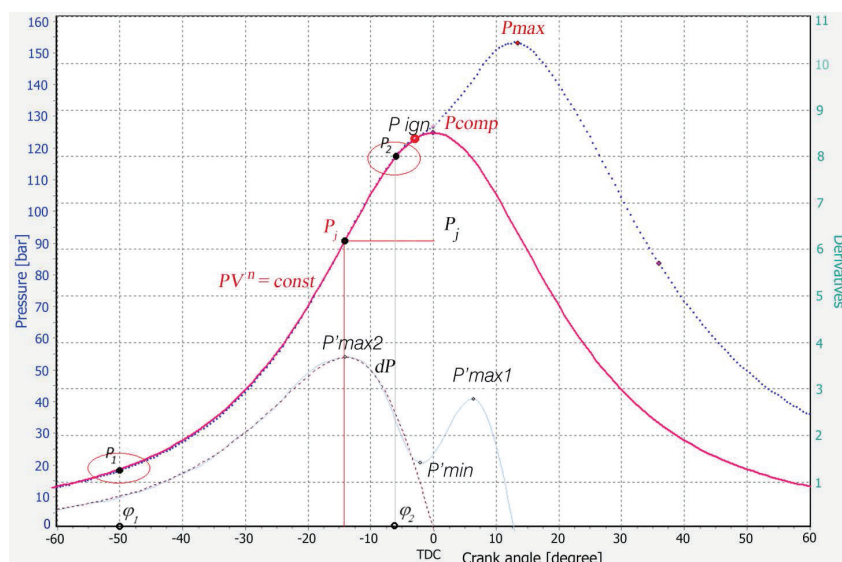


Рис. 3. Робочий процес чотиритактного дизеля YANMAR 6EY18ALW із займанням палива до ВМТ

Запишемо вираз, справедливий для будь-яких двох точок на кривій стиснення:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n = const. \quad (3)$$

Для того, щоб виключити вплив шумів на кривій тиску, значення P_1 і P_2 визначаються як значення квадратних поліномів, що апроксимують відповідні обведені ділянки біля точок P_1 і P_2 , див. рис. 3.

$$P_1 = a_1 \varphi_1^2 + b_1 \varphi_1 + c_1, \quad (4)$$

$$P_2 = a_2 \varphi_2^2 + b_2 \varphi_2 + c_2, \quad (5)$$

де коефіцієнти a_p, b_p, c_1 і a_2, b_2, c_2 поліномів, що апроксимують криву тиску, визначаються за допомогою методу найменших квадратів на ділянках $\varphi_1(\varphi_2) \pm 5 \dots 10$ °ПКВ залежно від зашумленості даних (див. обведені ділянки рис. 3).

З урахуванням виразів для об'ємів циліндра при фазах повороту колінчастого вала φ_1 і φ_2 , рівняння (3) можна записати як:

$$P_1(V_{S1} + V_C)^n = P_2(V_{S2} + V_C)^n; \quad (6)$$

$$\frac{V_{S1} + V_C}{V_{S2} + V_C} = \sqrt[n]{\frac{P_2}{P_1}} \quad (7)$$

де V_C – об'єм камери стиснення; $V_{S1} + V_C = V(\varphi_1)$, $V_{S2} + V_C = V(\varphi_2)$, а вираз для поточного об'єму циліндра $V(\varphi)$ запишемо у вигляді:

$$V(\varphi) = V_C + \frac{\pi D^2}{4} s(\varphi) \quad (8)$$

де D – діаметр циліндра.

$$s(\varphi) = R \left[\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda_{CR}}\right)^2 - k_p^2} - \frac{1}{\lambda_{CR}} \sqrt{1 - \lambda_{CR}^2 (\sin(\varphi) - k_p)^2} - \cos(\varphi) \right] \quad (9)$$

де R – радіуса кривошипа, $\lambda_{CR} = R / L$ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна, $k_p = e / R$ – відносний ексцентриситет, e – ексцентриситет кривошипа [3, 20].

Позначимо в (7) вираз під коренем $\sqrt[n]{\frac{P_2}{P_1}} = A$, і остаточно вираз для об'єму камери стиснення V_C у вигляді:

$$AV_C - V_C = V_{S1} - AV_{S2}; \quad (10)$$

$$V_C = \frac{V_{S1} - AV_{S2}}{A - 1} \quad (11)$$

Таким чином, отримані в результаті індиціювання двигуна значення тисків у двох точках P_1 , P_2 на кривій стиснення і приблизні початкові фази φ_1 і φ_2 відносно невідомої ВМТ дають можливість визначити об'єм камери стиснення $V_C = f(V_{S1}, V_{S2}, A)$ методом ітерацій, який буде необхідний для подальшого моделювання кривої стиснення в циліндрі:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n; \quad (12)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_{S1} + V_C}{V_{S2} + V_C} \right)^n \quad (13)$$

У зв'язку з температурною зміною постійного рівня неохолоджуваних датчиків тиску, які застосовуються в сучасних системах діагностування морських дизелів [4; 14; 18; 19], цей постійний рівень віднімають при вимірюваннях, виключаючи таким чином навіть приблизну оцінку тиску на початку стиснення P_a . Тоді тиски на кривій стиснення P_1 і P_2 з урахуванням невідомого тиску на початку стиснення запишемо:

$$P_1 = \bar{P}_1 + P_a; \quad (14)$$

$$P_2 = \bar{P}_2 + P_a, \quad (15)$$

де \bar{P}_1, \bar{P}_2 – значення тиску з відрахуванням постійним температурним постійним рівнем.

Як початкове наближення P_a (див. рис. 3) можна прийняти:

$$P_a = P_{ign} / \varepsilon_{pass}, \quad (16)$$

де ε_{pass} – паспортне або наближене значення ступеня стиснення в циліндрі.

За початкове наближення положення ВМТ можна умовно взяти фазу максимального тиску згоряння P_{max} . У такому випадку значення змінної φ включатиме шукану поправку для розрахункового положення ВМТ поршня:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \Delta\varphi_{TDC} \quad (17)$$

Початкове наближення положення ВМТ $\Delta\varphi_{TDC}$ визначається за допомогою методу, описаного нижче.

Для побудови моделі кривої стиснення (13), розробленої на основі рівняння політропи стиснення (2), використовуються дані тиску в робочому циліндрі. Ці дані отримані при індиціюванні двигуна з вирахуванням температурним постійним рівнем \bar{P}_j та з початковими приблизними оцінками P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$.

Отже, модель кривої стиснення P_j є функцією двох невідомих параметрів: P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$:

$$P_j = f(P_a, \Delta\varphi_{TDC}). \quad (18)$$

Моделювання здійснюється методом найменших квадратів за допомогою методу безградієнтної нелінійної n -параметричної мінімізації *Powell-64* [21]. Мінімізований функціонал запишемо у вигляді:

$$F = \sum_{j=\varphi_1}^{\varphi_2} \left[\bar{P}_j - P_j(P_a, \Delta\varphi_{TDC}) \right]^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

де φ_1, φ_2 – межі моделювання ділянки кривої стиснення.

Метод дозволяє визначити мінімум нелінійної функції n -змінних шляхом проведення послідовних пошуків вздовж системи сполучених напрямків [22]. Метод *Powell'64* не використовує похідних для здійснення пошуку, що зручно в практичних розрахунках. Метод є ефективним не тільки для квадратичних функцій, але й для нелінійних n -параметричних функцій загального вигляду.

У результаті мінімізації функціоналу отримуємо модель ділянки стиснення $[P_1 \dots P_2]$ (див. рис. 3), побудовану на базі даних індиціювання двигуна, і головне – отримуємо із заданою точністю значення P_a і $\Delta\varphi_{TDC}$, що дає можливість уточнити положення ВМТ і розв'язати задачу синхронізації даних (1) без використання ступеня стиснення в циліндрі. Остаточний аналіз даних індиціювання, після розв'язання задачі аналітичної синхронізації даних, дає можливість визначити середній індикаторний тиск MIP , індикаторну потужність циліндра $IPOWER$ та основні параметри робочого процесу, вказані в табл. 1.

Визначення початкового наближення вміт шляхом аналізу діаграм dP / dt . Початкове значення ВМТ поршня необхідне для реалізації наведеного вище методу визначення положення ВМТ $\Delta\varphi_{TDC}$ та тиску наддуву P_a . Проте насамперед швидко визначення початкового значення ВМТ, яке розраховується за часовими діаграмами $P(t, ms)$, необхідне для роботи системи діагностики морських дизельних двигунів у режимі реального часу, див. рис. 1. У цій частині статті пропонується емпірична формула для визначення ВМТ, що базується на аналізі діаграм

dP/dt , отриманих чисельним методом та оброблених цифровим фільтром [4, 16], рис. 4,5.

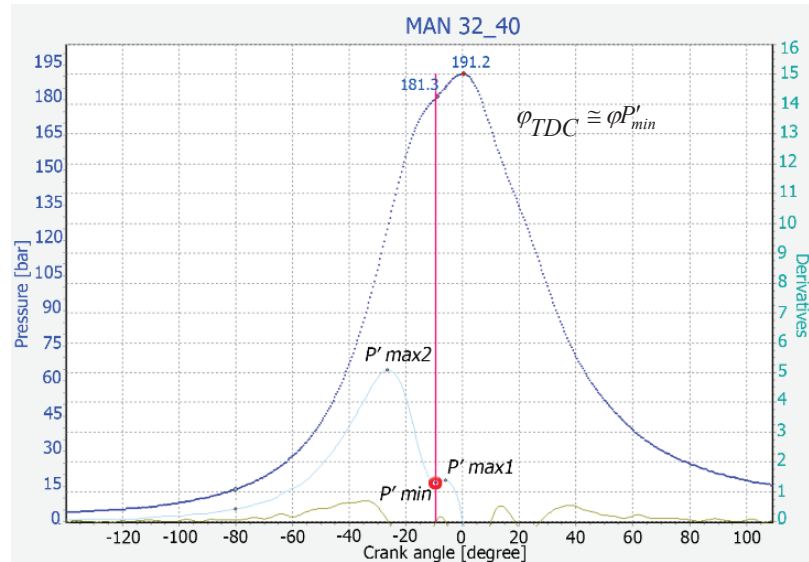


Рис. 4. Визначення початкового наближення ВМТ для двигуна MAN 32/40

За початкове положення ВМТ умовно береться точка максимального тиску P_{max} . Після цього обчислюється відхилення до початкового наближення, а потім ВМТ коригується методом, детально описаним раніше.

Вивчення даних, отриманих під час індиціювання морських двигунів за допомогою датчиків *IMES* [17], та аналіз результатів моделювання робочих процесів у програмному середовищі *Blitz-PRO* [20] дали змогу виявити важливу закономірність. Встановлено, що початкове наближення ВМТ можна визначити, аналізуючи співвідношення між амплітудами та відповідними фазами екстремумів на кривій швидкості зміни тиску в робочому циліндрі.

Аналіз даних індиціювання морських двигунів різних типів [3; 4] показав, що залежно від характеру робочого процесу та типу індикаторної діаграми положення ВМТ здебільшого знаходиться між фазами $[\varphi_{P' \min} \dots \varphi_{P' \max 1}]$ мінімуму першої похідної та максимуму першої похідної на ділянці згоряння.

Експериментально отримано співвідношення фаз максимумів перших похідних на ділянках згоряння $\varphi_{P' \max 1}$, стиснення $\varphi_{P' \max 2}$ та положення ВМТ φ_{TDC} , рис. 4, 5.

Для різних типів морських двигунів визначено, що у випадку «м'якого» згоряння, коли швидкість зміни тиску на ділянці згоряння менша, ніж на ділянці стиснення, положення ВМТ ближче до фази мінімуму першої похідної $\varphi_{P' \min}$, яка знаходиться між стисненням і згорянням, рис. 4.

Для двигунів з «жорстким» згорянням, коли максимум першої похідної на ділянці згоряння більший, ніж на ділянці стиснення, положення ВМТ знаходиться ближче до фази максимуму похідної на ділянці згоряння $\varphi_{P' \max 1}$, рис. 5.

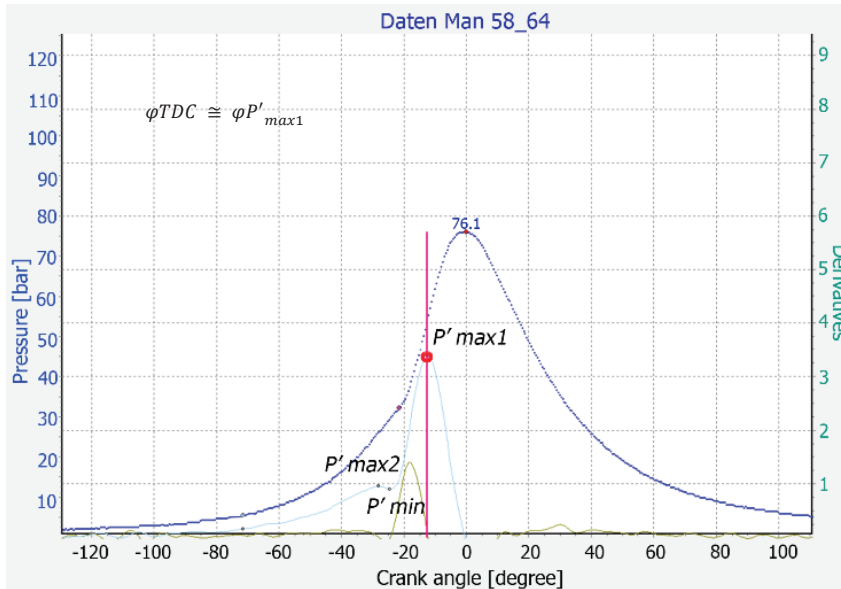


Рис. 5. Визначення початкового наближення ВМТ для двигуна MAN 58/64

При цьому виділяються два крайніх випадки залежно від відношення величин P'_{max1}/P'_{max2} (варто зазначити, що ці співвідношення базуються на емпіричних даних і потребують коригування для кожного конкретного типу двигуна):

$$\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}} < 0.5 \rightarrow TDC \cong \varphi P'_{min}; \quad (20)$$

$$\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}} > 3 \rightarrow TDC \cong \varphi P'_{max1}; \quad (21)$$

Для сучасних двигунів P'_{max1}/P'_{max2} – відношення швидкостей зміни тиску при згорянні та стисненні може бути меншим за 1.0, тобто швидкість підвищення тиску при згорянні менша, ніж при стисненні, що характеризує «м'яке» згорання [3] без значних динамічних навантажень на кривошипно-шатунний механізм та підшипники, див. рис. 4. У цьому випадку положення ВМТ ближче до фази мінімуму першої похідної $TDC \cong \varphi P'_{min}$.

Загалом, залежність між положенням ВМТ та екстремумами першої похідної можна представити такою емпіричною формулою:

$$\Delta \varphi_{TDC} = \varphi P'_{min} + \frac{\varphi P'_{max1} - \varphi P'_{min}}{\theta_1 - \theta_2} * \left(\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}} - \theta_2 \right), \quad (22)$$

де $\theta_1 = [3 \div 5]$, $\theta_2 = [0.3 \div 0.9]$ – емпіричні коефіцієнти; $\varphi P'_{min}$ – фаза мінімуму швидкості зміни тиску між фазами максимумів на стисненні та на згорянні; $\varphi P'_{max1}$ – фаза максимуму швидкості зміни тиску при згорянні палива; P'_{max1} і P'_{max2} – максимальні швидкості зміни тиску стиснення та згорання.

Результати розрахунку початкового наближення ВМТ для кількох двигунів з різними способами організації робочих процесів показано в табл. 2 та на рис. 6.

Таблиця 2

Визначення початкового наближення ВМТ

| Двигун: Weichai CCFJ40Y-W, $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 0$ | | | | | | | | | | | |
|--|------------|-----|------------|-----|-------------------------------|-----------|-------|----------------|-----------------------|-----------------|--------------|
| φ bTDC, °CA | P_{max2} | °CA | P_{max1} | °CA | $\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}}$ | P_{min} | °CA | ΔTDC^* | $\Delta\varphi_{TDC}$ | φ_{TDC} | ΔTDC |
| 6 bTDC | 172.49 | 348 | 634.2 | 359 | 3.676735 | 49.03 | 358 | 2 | 3.676734883 | 361.676735 | 1.676735 |
| 8 bTDC | 172.15 | 348 | 580.2 | 358 | 3.370317 | 70.4 | 357 | 3 | 3.370316584 | 360.370317 | 0.370317 |
| 10.4 bTDC | 171.95 | 348 | 588 | 356 | 3.419599 | 110 | 355 | 5 | 3.419598721 | 358.419599 | -1.5804 |
| 12 bTDC | 171.3 | 348 | 1110 | 354 | 6.47986 | 144.9 | 353 | 7 | 6.479859895 | 359.47986 | -0.52014 |
| Двигун: WUXI 277 грпм (5, 7, 10, 12 бТДС), $\theta_1 = 5$, $\theta_2 = 0.3$ | | | | | | | | | | | |
| φ bTDC, °CA | P_{max2} | °CA | P_{max1} | °CA | $\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}}$ | P_{min} | °CA | ΔTDC | $\Delta\varphi_{TDC}$ | φ_{TDC} | ΔTDC |
| 5 bTDC | 80.85 | 344 | 229.8 | 365 | 2.842301 | 15.68 | 358 | 2 | 3.786405084 | 361.786405 | 1.786405 |
| 7 bTDC | 80.85 | 344 | 261.8 | 364 | 3.238095 | 32.81 | 357 | 3 | 5.001013171 | 361.001013 | 1.001013 |
| 10 bTDC | 80.85 | 344 | 317.64 | 361 | 3.928757 | 54.67 | 355 | 5 | 6.176607587 | 359.176608 | -0.82339 |
| 12 bTDC | 80.85 | 344 | 358.88 | 359 | 4.438837 | 65.78 | 353 | 7 | 7.044829537 | 358.04483 | -1.95517 |
| Двигун: Wartsila 16V32, $\theta_1 = 3$, $\theta_2 = 0.3$ | | | | | | | | | | | |
| % iPOWER [φ_{inj} , °CA] | P_{max2} | °CA | P_{max1} | °CA | $\frac{P'_{max1}}{P'_{max2}}$ | P_{min} | °CA | ΔTDC | $\Delta\varphi_{TDC}$ | φ_{TDC} | ΔTDC |
| 0 [2, 14.5] | 299.3 | 346 | 308.13 | 366 | 1.029502 | 0.364 | 359.8 | 0.2 | 1.675153135 | 361.475153 | 1.475153 |
| +3% [4, 15] | 299.99 | 346 | 414.13 | 364 | 1.380479 | 70.18 | 358 | 2 | 2.401065221 | 360.401065 | 0.401065 |
| +5% [7, 16] | 300.47 | 346 | 518.62 | 361 | 1.726029 | 171.79 | 355 | 5 | 3.168953824 | 358.168954 | -1.83105 |
| 360.015057 0.015057 | | | | | | | | | | | |

* $\Delta TDC = \varphi P_{min} - 360^\circ$

З таблиці 2 випливає, що початкове визначення ВМТ здебільшого має відносно невисоку абсолютну похибку і може бути застосоване для роботи системи моніторингу в режимі реального часу. Перевагою розрахунку початкового наближеного значення ВМТ є висока швидкість обчислень, враховуючи необхідність попереднього визначення екстремумів першої похідної від кривої тиску. Також перевагою алгоритму є невисока чутливість до шумів першої похідної від експериментальних даних тиску.

Недоліком алгоритму є необхідність підбору коефіцієнтів θ_1 , θ_2 . Проте одночасово підібрані коефіцієнти можуть потім бути використані для основних експлуатаційних режимів двигуна, що дає можливість аналізувати діаграму тиску в циліндрі в реальному часі.

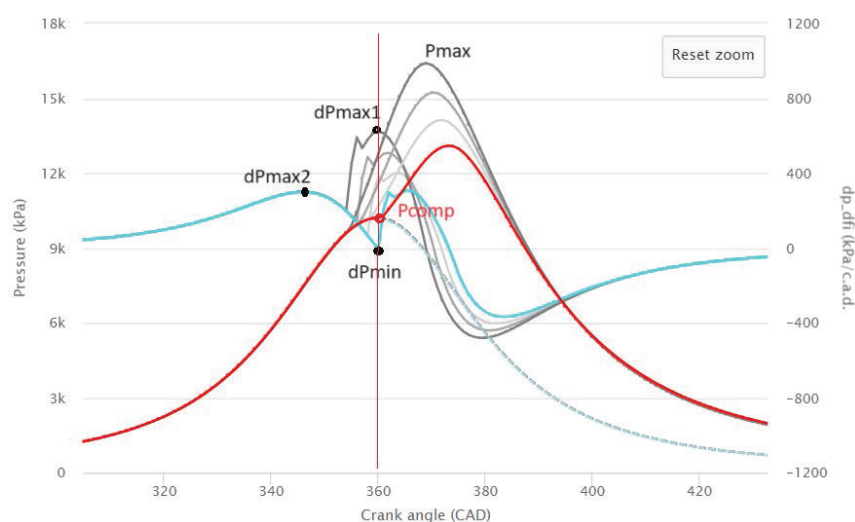


Рис. 6. Робочий процес двигуна Wartsila 16V32 з різними кутами випередження впорскування палива

Висновки. Запропонований метод визначення ВМТ поршня базується на аналізі ділянки кривої стиснення в циліндрі. На відміну від інших методів, він має більшу точність, оскільки не використовує похідні від кривої тиску, які мають високий рівень шуму в експериментальних даних. Запропонований метод визначення ВМТ працює за відсутності інформації про фактичний ступінь стиснення в циліндрі, що характерно для сучасних двигунів зі змінними фазами газорозподілу.

Запропонований алгоритм попередньої синхронізації, який визначає початкове положення ВМТ з достатньою для більшості практичних випадків точністю, використовується як перше наближення для розробленого методу. Використання датчика тиску газів у робочому циліндрі та датчика вібрації в системі моніторингу робочого процесу реального часу розширює можливості діагностики суднових дизелів. Паралельно з аналізом тиску в робочому циліндрі датчик вібрації дозволяє аналізувати фази подачі палива та газорозподілу. У режимі реального часу

можливе розв'язання задачі синхронізації даних до переведення даних із функцій часу у функції за кутом повороту колінчастого вала. Діагностика морських двигунів у реальному часі має низку переваг, оскільки дає можливість аналізувати поточний стан циліндро-поршневої групи, паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу безпосередньо під час експлуатації. Система діагностики в реальному часі дозволить виконувати оптимальне налаштування відповідних механізмів та контролювати результат їх налаштування під час експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. *International Maritime Organization* : веб-сайт. URL: <https://www.imo.org/en/Our-Work/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx> (дата звернення: 09.06.2024).
2. Bach H., Hansen T. IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy*. 2023. Vol. 147. P. 105379 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379> (date of access: 04.06.2024).
3. Heywood J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York : McGraw-Hill. 1988. 930 p.
4. Варбанець Р. А. Діагностичний контроль робочого процесу судових дизелів в експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03. Одеса, 2010. 314 с.
5. Advanced marine diesel engines diagnostics for IMO decarbonization compliance / Varbanets R, Minchev D, Savelieva I, Rodionov A, Mazur T, Psariuk S, Bondarenko V. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3104(1). P. 020004. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0198828>.
6. Polanowski S. Determination of location of Top Dead Centre and compression ratio value on the basis of ship engine indicator diagram. *Polish Maritime Research*. 2008. Vol. 15, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10012-007-0065-2> (дата звернення: 05.06.2024).
7. Tunestål P. Model Based TDC Offset Estimation from Motored Cylinder Pressure Data. *IFAC Proceedings Volumes*. 2009. Vol. 42, no. 26. P. 241–247. DOI: <https://doi.org/10.3182/20091130-3-fr-4008.00032> (дата звернення: 03.06.2024).
8. Pipitone E., Beccari A. Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach. *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30, no. 14-15. P. 1914–1926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.04.012> (дата звернення: 14.05.2024).
9. Staś M. J. An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination. *SAE 2000 World Congress*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2000. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0561> (дата звернення: 04.07.2024).
10. Tazerout M., Le Corre O., Stouffs P. Compression Ratio and TDC Calibrations Using Temperature – Entropy Diagram. *International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale,

- PA, United States, 1999. DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-3509> (дата звернення: 24.05.2024).
11. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / R. Varbanets et al. *Diagnostyka*. 2020. Vol. 21, no. 1. P. 51–60. URL: <https://doi.org/10.29354/diag/116585> (дата звернення: 24.06.2024).
 12. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data / S. Neumann et al. *Diagnostyka*. 2019. Vol. 20, no. 2. P. 19–26. URL: <https://doi.org/10.29354/diag/104516> (дата звернення: 04.07.2024).
 13. Improvement of Diagnosing Methods of the Diesel Engine Functioning under Operating Conditions / R. Varbanets et al. *International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2017. URL: <https://doi.org/10.4271/2017-01-2218> (дата звернення: 04.07.2024).
 14. IMES cylinder pressure sensors : веб-сайт. URL: <https://www.imes.de> (дата звернення: 16.01.2024).
 15. Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications / D. Minchev et al. *Polish Maritime Research*. 2023. Vol. 30, no. 4. P. 81–91. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061> (дата звернення: 04.07.2024).
 16. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems / S. Neumann et al. *Ships and Offshore Structures*. 2022. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558> (дата звернення: 04.07.2024).
 17. Neumann S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control [Text]. *CIMAC Congress*. Hamburg : Digest, 2001. P. 1–12.
 18. Lehmann & Michels GmbH. *Premet type L, LS, and XL electronic indicators*. 2006. Retrieved from: http://www.lemag.de/fileadmin/user_upload/PREMET_liste_100_04_2006.pdf (дата звернення: 11.06.2024).
 19. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service: веб-сайт. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (дата звернення: 24.01.2024).
 20. Minchev D. *Blitz-PRO User's manual*. Retrieved from: URL: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf> (дата звернення: 09.06.2024).
 21. Himmelblau D. M. *Applied nonlinear programming*. New York : McGraw-Hill. 1972. 498 p.
 22. Powell MJD. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*. 1964. Vol. 7, Issue 2. P. 155–162. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.155> (дата звернення: 19.06.2024).

REFERENCES

1. *IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships*. (2023). International Maritime Organization. Retrieved June 9, 2024, from <https://www.imo.org>

- imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx.
2. Bach, H., & Hansen, T. (2023). IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy*, 147, 105379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379>.
 3. Heywood, J.B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*, New York: McGraw-Hill, 930 p.
 4. Varbanets, R. (2010). *Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: Doctoral dissertation*. Odessa National Maritime University, Odessa, 314 p.
 5. Varbanets, R., Minchev, D., Savelieva, I., Rodionov, A., Mazur, T., Psariuk, S., & Bondarenko, V. (2024). Advanced marine diesel engines diagnostics for IMO decarbonization compliance. *Transport, ecology, sustainable development: EKO Varna 2023. In AIP Conference Proceedings* (Vol. 3104, No. 1). AIP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0198828>.
 6. Polanowski, S. (2008). Determination of location of Top Dead Centre and compression ratio value on the basis of ship engine indicator diagram. *Polish Maritime Research*, 15(2). DOI: <https://doi.org/10.2478/v10012-007-0065-2>.
 7. Tunestål, P. (2009). Model Based TDC Offset Estimation from Motored Cylinder Pressure Data. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(26), 241–247. DOI: <https://doi.org/10.3182/20091130-3-fr-4008.00032>.
 8. Pipitone, E., & Beccari, A. (2010). Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), 1914–1926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.04.012/>
 9. Staś, M. J. (2000). An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination. *Y SAE 2000 World Congress*. SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0561>.
 10. Tazerout, M., Le Corre, O., & Stouffs, P. (1999). Compression Ratio and TDC Calibrations Using Temperature - Entropy Diagram. *Y International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*. SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-3509>.
 11. Varbanets, R., Zalozh, V., Shakhov, A., Savelieva, I., & Pitera, V. (2020). Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 21(1), 51–60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
 12. Neumann, S., Varbanets, R., Kyrylash, O., Yeryganov, O., & Maulevych, V. (2019). Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. *Diagnostyka*, 20(2), 19–26. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/104516>.
 13. Varbanets, R., Karianskyi, S., Rudenko, S., Gritsuk, I. V., Yeryganov, A., Kyrylash, O., & Aleksandrovskaia, N. (2017). Improvement of Diagnosing Methods of the Diesel Engine Functioning under Operating Conditions.

- Y International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. SAE International. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-2218>.
14. IMES cylinder pressure sensors: web site. URL: <https://www.imes.de> (Retrieved: 16.01.2024).
 15. Minchev, D., Varbanets, R., Shumylo, O., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Bratchenko, P., & Truong, T. H. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*, 30(4), 81–91. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.
 16. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., & Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>
 17. Neumann, S. (2001). High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control. *In: CIMAC Congress, Hamburg Digest*, pp. 1-12.
 18. Lehmann & Michels GmbH (2006). *Premet type L, LS, and XL electronic indicators*: web site. Retrieved from: http://www.lemag.de/fileadmin/user_upload/PREMET_liste_100_04_2006.pdf (Retrieved: 11.06.2024).
 19. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service: web site. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (Retrieved: 24.01.2024).
 20. Minchev D. *Blitz-PRO User's manual*. Retrieved 09.06.2024, from: URL: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf>.
 21. Himmelblau, D. M. (1972). *Applied nonlinear programming*. McGraw-Hill.
 22. Powell, M. J. D. (1964). An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 7(2), 155–162. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.155>.

ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ПОКРАЩЕННЯ
ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОХОДІВ

С.О. Зеленьок¹, Н.І. Александровська², С.А. Потравко³

¹аспірант кафедри “СЕУ і ТЕ”,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-6771-9844

²завідувач кафедри «Суднобудування і судноремонт»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³старший викладач кафедри «Суднобудування і судноремонт»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0002-5886-9692

Анотація

Вступ. У роботі представлена коротка історія виникнення та розвитку суден-електроходів у світовій морській галузі та підкреслена їхня зростаюча роль у наш час, що є результатом використання тих переваг, які характерні для суден з електрорухом – екологічність, економічність, кращі експлуатаційні та динамічні характеристики, тощо. Виходячи з наведеної узагальненої схеми об'єднаної електроенергетичної системи електроходу та виділених її основних компонентів, визначено основні фактори, що впливають на зміну характеристик суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) під час динамічних навантажень. З іншого боку, локальні регулятори складових частин СЕЕС – автоматичний регулятор частоти обертання первинних двигунів, автоматичний регулятор напруги генераторів, контролер частотного перетворювача налаштовуються таким чином, щоб забезпечити оптимальне функціонування своїх об'єктів регулювання переважно у статичних режимах роботи. Наступним кроком у розвитку систем автоматичного управління (САУ) СЕЕС є впровадження багаторівневих систем зі своїми стратегіями управління, що дозволяє привести у відповідність експлуатаційні характеристики суднових пропульсивних комплексів з вимогами класифікаційних товариств до параметрів електричних мереж під час перехідних процесів, які також наведені у статті. Численні дослідження та пропозиції для вирішення таких завдань, кількість наведених джерел та широка тематика проблем, що висвітлюються в них, дозволяє стверджувати, що розвиток та вдосконалення СЕЕС для суден з електрорухом, а також їх регуляторів та систем управління ще довго залишаться актуальними.

Мета. Огляд наявних напрямків розвитку ЕЕС суден з гребною електричною установкою (ГЕУ) в цілому, частин цих систем, систем контролю та аналіз таких напрямів щодо поліпшення динамічних характеристик як самих систем, так і їх регуляторів.

Результати. За підсумками огляду серед основних тенденцій, що визначають розвиток СЕЕС електроходів можна назвати застосування нових джерел енергії,

збільшення загальної потужності установок та енергетичної щільності їх окремих складових частин, поява потужних короткочасних імпульсних навантажень, відмова від електромеханічних вузлів автоматики на користь електронних пристроїв. З іншого боку, проблеми обмінних коливань у багатоагрегатних суднових електростанціях, випадкові відключення СЕЕС під час динамічних процесів, погіршення якості електроенергії в суднових електромережах за рахунок присутності вищих гармонійних складових, зумовлених застосуванням потужних статичних напівпровідникових перетворювачів, ще чекають на своє остаточне рішення. При моделюванні динамічних режимів у деяких джерелах використовуються математичні моделі з лінеаризованими рівняннями, без урахування нелінійностей, властивості яких елементи СЕЕС набувають під час динамічних навантажень. Також використовуються моделі з одиничними генеруючими агрегатами, при цьому впливом обмінних коливань нехтують. Не вдалося знайти досліджень, присвячених реакції автоматичних регуляторів на зміну стану первинних двигунів внаслідок відмов і несправностей. Більшість запропонованих шляхів поліпшень динамічних характеристик матеріало- та трудомісткі, вимагають значних проміжків часу для впровадження та підходять для перспективних типів електроходів.

Висновки. За визнанням авторів опрацьованих статей, існує низка проблем для СЕЕС електроходів, що виникають під час динамічних процесів. Для їх вирішення необхідно розробити математичну модель СЕЕС з урахуванням нелінійних властивостей частин системи, що виявляються в перехідних режимах. Після перевірки та проведення експерименту з моделлю потрібно розробити адаптивний регулятор із включенням до числа вхідних сигналів його такого, який відображав би технічний стан первинного двигуна. Створення такого регулятора дозволить судам з електрорухом оптимально проходити динамічні обурення за критеріями безпеки, економічності та енергоефективності.

Ключові слова: судно-електрохід, пропульсивна електрична установка, гребна електрична установка, автономна електрична установка, динамічні процеси, система управління енергією, дизель-генератор, система автоматичного управління, стратегія управління, ємнісна передача енергії, обмінні коливання потужності, іоністор, надпровідник.

OVERVIEW OF PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF VESSEL ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS

S.O. Zeleniuk¹, N.I. Aleksandrovska², S.A. Potravko³

¹graduate student of the «SEU and TE» department,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-6771-9844

²PhD in Technical Sciences, Associate professor,
Head of the Department of Shipbuilding and Ship repair,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³Senior lecturer of the Department of Shipbuilding and Ship repair,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0002-5886-9692

Summary

Introduction. The work presents a brief history of the emergence and development of electric ships in the global maritime industry and emphasizes their growing role in our time, which is the result of using those advantages that are characteristic of ships with electric propulsion – environmental friendliness, economy, better operational and dynamic characteristics, etc. Based on the given generalized scheme of the combined electric power system of the electrically driven and its main components, the main factors affecting the change in the characteristics of ship electric power systems (SEPS) during dynamic loads are determined. On the other hand, the local regulators of the constituent parts of the SEPS – the automatic regulator of the rotation frequency of the primary engines, the automatic regulator of the voltage of the generators, the controller of the frequency converter are adjusted in such a way as to ensure the optimal functioning of their regulatory objects mainly in static modes of operation. The next step in the development of automatic control systems (ACS) of the SEPS is the implementation of multi-level systems with their own control strategies, which allows to bring the operational characteristics of ship propulsion systems into compliance with the requirements of classification societies for the parameters of electrical networks during transient processes, which are also given in the article. Numerous studies and proposals for solving such tasks, the number of cited sources and the wide range of issues highlighted in them, allow us to assert that the development and improvement of SEPS for vessels with electric propulsion, as well as their regulators and control systems, will remain relevant for a long time. **Purpose.** An overview of the available directions for the development of the EPS of vessels with a electric propulsion plants as a whole, parts of these systems, control systems and analysis of such directions for improving the dynamic characteristics of both the systems themselves and their regulators. **Results.** According to the results of the review, among the main trends that determine the development of electric rowing vessels SEPS, we can mention the use of new energy sources, an increase in the total power of installations and the energy density of their individual components as well, the appearance of powerful short-term impulse loads, the abandonment of electromechanical automation units in favor of electronic devices. On the other hand, the problems of exchange oscillations in multi-unit ship power plants, accidental shutdowns of SEPS during dynamic processes, deterioration of the quality of electricity in ship power networks due to the presence of higher harmonic components caused by the use of powerful static semiconductor converters, are still waiting for their final solution. When modeling dynamic modes, some sources use mathematical models with linearized equations, without taking into account nonlinearities, the properties of which SEPS elements acquire during dynamic loads. Models with single generating units are also used, while the influence of exchange fluctuations is neglected. It was not possible to find studies devoted to the response of automatic regulators to changes in the condition of primary engines due to failures and malfunctions. Most of the proposed ways of improving dynamic characteristics are material- and labor-intensive, require significant periods of time for implementation, and are suitable for promising types of electric vessels. **Conclusions.** According to the authors of the studied articles, there are a number of

problems for electric ships SEPS that arise during dynamic processes. In order to solve them, it is necessary to develop a mathematical model of the SEPS, taking into account the nonlinear properties of the parts of the system that appear in transient modes. After checking and conducting an experiment with the model, it is necessary to develop an adaptive regulator with the inclusion of one of the input signals that would reflect the technical condition of the primary engine. The creation of such a regulator will allow ships with electric propulsion to optimally undergo dynamic disturbances according to the criteria of safety, economy and energy efficiency.

Key words: *electric rowing ship, propulsion electric plant, rowing electric plant, islanded electric grid, transient process, power management system, diesel generator, automatic control system, control strategy, capacitive energy transfer, power exchange fluctuations, supercapacitor, superconductor.*

Вступ. Деякі джерела називають XXI століття «золотим» століттям розвитку електрики у суднобудуванні [1]. Це не дивно оскільки, розпочавшись з малопотужних динамо як джерел електроенергії для мереж освітлення парових суден [2] та гальванічних батарей для живлення приводів гребних коліс прогулянкових човнів у 80-х роках XIX століття, електрика перетворилася на одне з головних джерел енергії на судах у наш час. Вирішуючи безліч завдань за рахунок застосування електрики, суднобудівники також застосували його для забезпечення руху суден. Першим прикладом електрохода став танкер «Вандал», початок експлуатації – 1903 р., з електростанцією на постійному струмі сумарною потужністю 220 кВт [2]. На сьогоднішній день системи електроруку застосовуються на багатьох типах суден: буксири, круїзні лайнери, пороми, судна-кабелеукладачі, спеціальні судна газо- та нафтопромисловості, військові кораблі тощо. Потужність електроустановок сучасних суден перебуває у діапазоні 2-150 МВт залежно від типу судна, у тому числі 50-82% споживання посідає безпосередньо на пропульсивні комплекси [3].

При всьому різноманітті варіантів архітектурних рішень пропульсивних комплексів суден-електроходів, як «класична» електроенергетична система (ЕЕС) [2] може бути представлена система круїзного лайнера «Queen Elizabeth 2» (рис.1).

Як видно з ескізу, основними складниками такої ЕЕС є:

– Первинні двигуни. На ескізі представлені дизелі, проте на деяких типах суден можуть застосовуватися парові та газові турбіни.

– Генератори. Залежно від обраного роду струму можуть бути постійного та змінного струму. Переважна більшість генераторів, що застосовуються в даний час, це трифазні синхронні електричні машини змінного струму з частотою 50/60 Гц з самозбудженням. Вал генератора з'єднаний з валом первинного двигуна, двигун і генератор утворюють єдиний динамічний комплекс і є частиною системи, що генерує електроенергію. Число таких генеруючих агрегатів може коливатися. Найбільш поширена їх кількість – 4 одиниці, для підвищення надійності їх кількість може бути збільшено, зокрема для «Queen Elizabeth II» було використано 9 генеруючих агрегатів [2].

– Головний розподільчий щит (ГРЩ). Основна функція – комутація та синхронізація задіяних у певному режимі генераторів у єдину мережу,

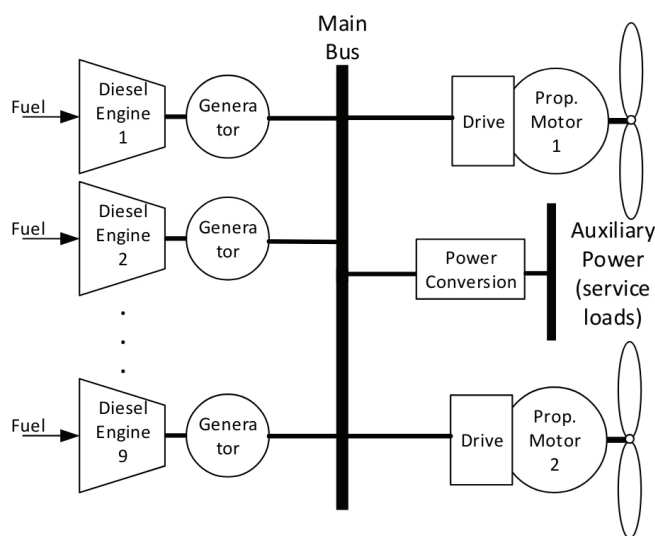


Рис. 1. Спрощений ескіз об'єднаної електроенергетичної системи електроходу «Queen Elizabeth II» [2]

забезпечення рівномірного навантаження для кожного з працюючих генераторів, забезпечення енергією споживачів. ГРЩ також виконують функції захисту електрообладнання, на ньому встановлені вимірювальні прилади.

– Джерела живлення гребних електродвигунів. Як джерела живлення в сучасних системах електрорухо використовуються силові напівпровідникові частотні перетворювачі [4], що дозволяють регулювати швидкість обертання та здійснювати реверсування гребних електродвигунів.

– Гребні електродвигуни (ГЕД). Завдяки використанню напівпровідникових частотних перетворювачів для живлення ГЕД вдалося розширити використання індукційних асинхронних двигунів поряд з електродвигунами постійного струму і синхронними двигунами.

– Мережа допоміжних навантажень. Оскільки представлена класична ЕЕС є об'єднаною, для живлення решти суднових навантажень, крім пропульсивного комплексу, використовуються понижуючі трансформатори, так як робоча напруга пропульсивної установки зазвичай вище, ніж напруга живлення насосів, навігаційного обладнання, мереж освітлення і т.д., і окрема система розподільчих щитів.

Окремим пунктом, не зазначеним на рис.1, потрібно виділити регулятори та систему керування пропульсивним комплексом електрохода. Як правило, система управління багаторівнева [5], один із прикладів наведено на рис.2. Регулятори первинного рівня тут це регулятор частоти обертання первинного двигуна, який також використовується для розподілу активного навантаження між генераторами, що працюють в паралелі, і автоматичний регулятор напруги синхронного генератора, що також використовується для рівномірного розподілу реактивного навантаження при паралельній роботі генераторів. Кожен дизель-генератор має ці два типи регуляторів. Статичні частотні перетворювачі, що застосовуються для живлення гребних електродвигунів, також мають свої системи електронного

регулювання силовими напівпровідниковими елементами, останні покоління реалізовані з використанням програмованих логічних контролерів (ПЛК). Вторинний рівень контролю ЕЕС, званий «системою управління енергією» або «системою управління живленням» від англійської Power Management System (PMS) відповідає за конфігурацію електростанції в різних режимах роботи, введення-виведення резервного генератора в роботу, контроль основних параметрів та забезпечення безпечного режиму експлуатації електричної мережі [5]:

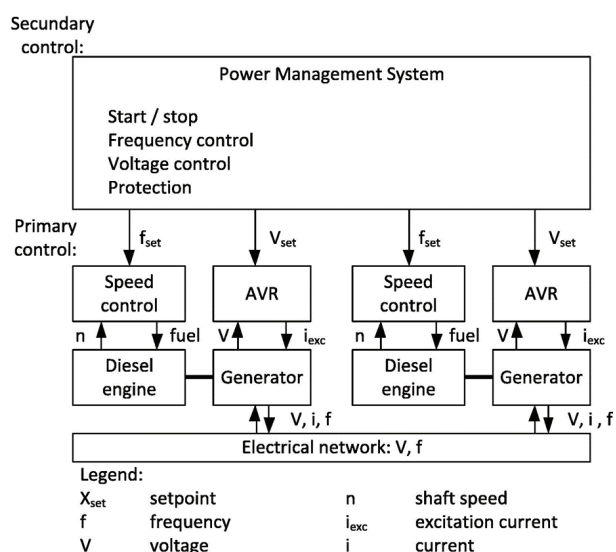


Рис. 2. Двохрівнева система управління електроенергетичною установкою судна з електрорухом [5]

Враховуючи історію експлуатації ЕЕС на флоті, що триває понад сторіччя, а також кількість існуючих міжнародних та державних наглядових установ, не можна оминути питання стандартизації вимог, що висуваються до самої ЕЕС, її частин, характеристик виробленої системою електроенергії. До таких організацій належать національні Морські класифікаційні товариства, наприклад – Lloyd's Register, Det Norske Veritas, Регістр судноплавства України тощо, Міжнародна організація зі стандартизації ISO, Інститут інженерів електротехніки та електроніки IEEE та інші. Основним критерієм існуючих вимог є забезпечення високої якості електроенергії, надійності силового електронного обладнання та безпеки екіпажу на борту судна. Зокрема, введено обмеження щодо відхилень частоти та напруги від номінальних значень. Для сталих режимів відхилення по напрузі не можуть перевищувати +6%, -10%, для частоти +- 5% [6]. При динамічних режимах роботи дозволяються короточасні, до 1,5 с, відхилення напруги +- 20% та в межах 5с відхилення +-10% за частотою [6]. Регламентується також значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових кривої напруги, яке не повинно перевищувати 5% [6]. Для сумарного коефіцієнта спотворення розрахунки виробляються до 40й гармоніки. Для розрахунку коефіцієнта спотворення по кожній гармоніці коефіцієнт спотворення не повинен перевищувати 1,5% [6]. Оскільки

суднові електростанції складаються з кількох генеруючих агрегатів, регламентуються вимоги до їхньої паралельної роботи:

- нерівномірність частоти обертання дизель-генераторів змінного струму, призначених для паралельної роботи, повинна бути такою, щоб амплітуда кутових коливань валу генератора була не більшою за $3,5 \text{ градуса}/P$, де P – число пар полюсів генератора [6];

- різницю активних навантажень і реактивних падінь напруги генераторів різної потужності, що працюють у паралелі, не повинні перевищувати 10% номінальної потужності найбільшого генератора або не більше ніж на 25% номінальної потужності найменшого генератора [6];

Окремо виділено вимоги до регуляторів первинних двигунів ЕЕС під час перехідних процесів:

- при миттєвому накиданні активного навантаження ДГ повинен навантажуватись ступенями. Залежно від ступеня форсування дизеля за середнім ефективним тиском всього передбачено 3 ступені [7];

- при скиданні або накиданні максимального ступеня навантаження генератора, зміна частоти в мережі не повинна перевищувати 10% розрахункової [7];

- при миттєвому накиданні навантаження від нульового до 50% розрахункового навантаження генератора, а також при наступному (після досягнення частоти обертання, що встановилася) накиданні 50% навантаження генератора, що залишилися, короткочасна зміна частоти обертання двигуна не повинна перевищувати 10% розрахункової частоти обертання. Накидання електричного навантаження більш ніж двома ступенями може бути допущено, якщо суднова електрична установка дозволяє використання привідних двигунів, які можуть навантажуватися лише більш ніж двома ступенями та за умови, що це вже допущено на стадії проектування судна. Це має бути підтверджено у схваленій документації та перевірено під час випробувань на судні. У цьому випадку величина навантаження, яка повинна автоматично вмикатися після знеструмлення, а також послідовність включення навантаження повинні відповідати ступеням навантаження двигуна [7].

Актуальність. Наведений останній пункт, що допускає знеструмлення при динамічних накидах навантаження в ЕЕС, у тому числі й суден-електроходів, змушує докладніше зупинитися на проблемах експлуатації пропульсивних комплексів суден з електрорухом, деякі з яких залишаються невирішеними і в даний час.

Мета досліджень – огляд наявних напрямків розвитку ЕЕС суден з гребною електричною установкою (ГЕУ) згідно узагальненої схеми наданої вище та аналіз таких напрямів щодо поліпшення динамічних характеристик як самих систем, так і їх регуляторів.

Оскільки первинними джерелами енергії є дизельні двигуни, то динамічні постійні часу їх суттєво довші по відношенню до тимчасових характеристик електричної частини суднових ЕЕС за ступенем сприйняття навантаження, що призводить до глибоких провалів за частотою і напругою мережі, тобто веде до можливості неконтрольованих «блекаутів». Дизельні двигуни, розраховані в достатніх межах, щоб забезпечувати необхідну потужність споживачів в сталих режимах, часом не встигають впоратися з запитами на збільшення потужності при маневруванні, поганій погоді, реверсах та інших динамічних збуреннях [7].

Серед способів поліпшення динамічних характеристик дизельних двигунів застосовують збільшення інерційних мас ДГ, що має знизити провали частоти обертання первинних двигунів, отже, і провали частоти і напруги у електричних ланцюгах. Однак, цей спосіб має негативний ефект, тому що зі збільшенням маси маховиків збільшується і тривалість перехідних процесів [7]. Іншими шляхами покращення динаміки дизельних двигунів є:

- соплове регулювання турбіни;
- регулювання частоти обертання ТК впливом на систему постачання повітря з боку компресора;
- додаткова подача повітря в повітряний ресивер та циліндри дизеля;
- збільшення частоти обертання ТК у період розгону за рахунок подачі повітря на лопатки газової турбіни;
- застосування спеціальних пристроїв для отримання додаткового моменту на валу ТК [7].

Всі наведені вище способи означають глибоку модернізацію існуючих дизельних двигунів, а значить економічно є капіталомісткими і в кінцевому підсумку ведуть до заміни всієї суднової електростанції.

Наступним етапом покращення динамічних характеристик ЕЕС електроходів можна назвати модернізацію самих синхронних генераторів. Найбільш примітивним рішенням є просте збільшення потужності агрегату електростанції, за рахунок чого пропонується покривати дефіцит потужності при перехідних процесах.

Як джерело електроенергії на судах зазвичай використовуються безщіткові синхронні машини з самозбудженням, які фактично є 2 електричними машинами на одному валу – збудник, основний генератор і з'єднаний з ними в одну систему управління автоматичний регулятор напруги (АРН). Спрощена схема такого генератора представлена рис.3.

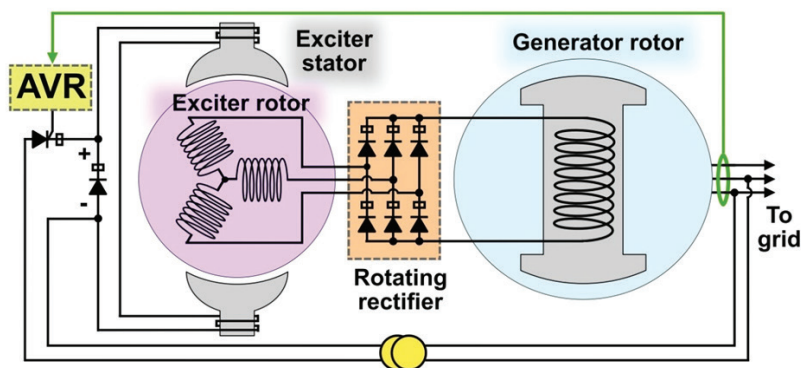


Рис. 3. Узагальнена схема суднового безщіткового генератора [8]

Стрибки напруги основної мережі, що виникають при різких набросах/скидах навантаження, уловлюються датчиками АРН, що у відповідність до свого закону регулювання збільшує/зменшує струм збудження збудника й у кінцевому підсумку – ступінь збудження основного генератора, відпрацьовує відхилення напруги від номінального

значення. Швидкодія вищезазначеного контуру регулювання, тобто системи збудження, визначає динамічні властивості синхронного генератора і є об'єктом постійного вдосконалення. Одним із шляхів такого поліпшення є застосування постійних магнітів замість статорної (нерухомої) обмотки збудника (рис.4), що дозволяє збільшити величину магнітного потоку в збуднику, уникнути обмежень, викликаних явищем насичення заліза статора збудника [8]. Оскільки керувати магнітним потоком постійного магніту неможливо, регулювання струму збудження роторної обмотки основного генератора здійснюється за рахунок обертового керованого перетворювача, кут відкриття тиристорів якого здійснюється АРН з бездротовою передачею керуючого впливу. Недоліками такої схеми є присутність пульсацій валу електричної машини, обумовлених застосуванням тиристорного перетворювача, що обертається, а також істотне падіння напруги на ньому [8].

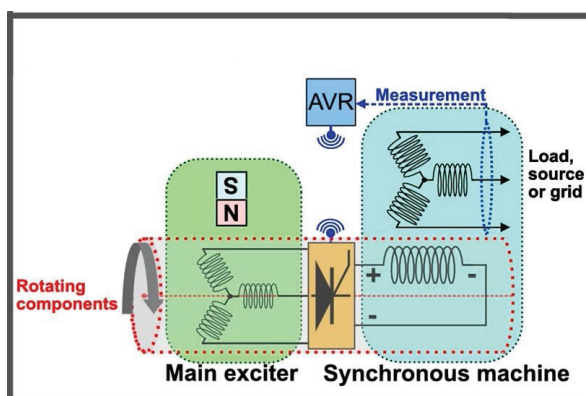


Рис. 4. Схема збудження синхронного генератора із застосуванням постійного магніту та керованого тиристорного перетворювача [8]

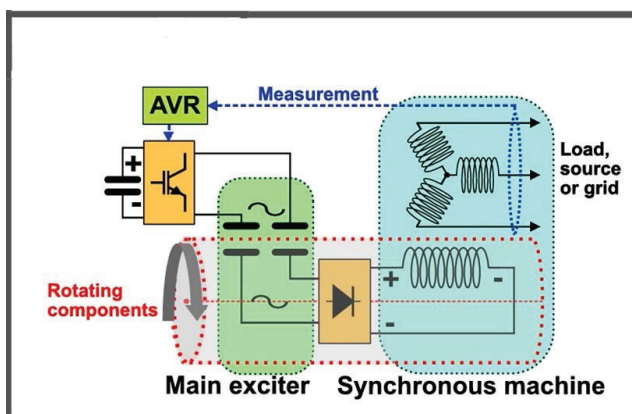


Рис.5 Система збудження СГ з використанням технології ємнісної передачі енергії [8]

Іншим напрямком удосконалення систем збудження є застосування технології ємнісної передачі енергії (Capacitive Power Transfer). Сутність її полягає

в розташуванні вкладених одна в одну пар циліндричних провідних пластин, зовнішня з яких займає місце нерухомої обмотки збудника, а внутрішня закріплена на роторі синхронної машини (рис. 6). Зазор між циліндрами невеликий і енергія, необхідна для обмотки збудження основного генератора, передається через конденсатори, що утворилися. Ця технологія є перспективною і нині застосовна для малопотужних машин [9].

Для прискорення досягнення максимальної напруги в ланцюзі збудження, а значить і поліпшення динамічних характеристик генератора, застосовуються також батареї конденсаторів [9].

Наступним типом проблем, з яким доводиться стикатися при експлуатації суднових ЕЕС, є обмінні коливання потужності при паралельній роботі декількох генеруючих агрегатів. Обмінні коливання потужності – це явище своєрідного переходу потужності від одного ДГ до іншого з частотою, що вимірюється кількома герцями [10]. Осцилограма зміни активної потужності кожного з двох паралельно працюючих ДГ є приблизно синусоїдальною кривою цієї зміни з дзеркальним характером, тобто. максимуму потужності одного ДГ на даний час відповідає мінімум потужності іншого ДГ (і навпаки) [10]. Обмінні коливання виникають у тому числі і при динамічних коливаннях навантаження і можуть призвести до нестабільної роботи генераторів, випадіння їх із синхронізму, аварійної зупинки та поломки [10]. Проблема існування обмінних коливань потужності між синхронними генераторами була виявлена давно, залишається не до кінця вирішеною до сьогоднішнього дня, а нижче наведено деякі запропоновані шляхи їх усунення. Одним з таких шляхів є введення в систему управління судновою електростанцією додаткового адаптивного регулятора (рис.6), позначеного як блок ПОКП (пристрій обмінних коливань потужності) [11]. Блок ПОКП отримує інформацію від усіх дизелів і генераторів працюючих у паралельному режимі, після чого він обробляє інформацію та у разі необхідності здійснює підстроювання коефіцієнтів передачі та уставок за частотою обертання автоматичних регуляторів частоти обертання первинних двигунів. Проте, на думку самого автора, такий регулятор не буде ефективним для динамічних режимів суднової ЕЕС. Іншим прикладом удосконалення систем збудження СГ є застосування алгоритму активного керування придушенням перешкод (Active Disturbance Rejection Control ADRC) та включення контролера на основі такого алгоритму у систему збудження генератора [12]. Блок-схема такого контролера (рис.7) містить такі основні компоненти – диференціатор відстеження (Tracking Differentiator TD), розширений спостерігач стану (extended state observer ESO), ланка нелінійного зворотного зв'язку помилки стану (nonlinear state error feedback NLSEF). Результати моделювання динамічних процесів – накидання навантаження, 1- та 3-фазних коротких замикань для 2х працюючих у паралелі СГ з використанням ADRC-фільтра в ланцюзі збудження показали значне зменшення відхилень напруги в основній мережі та часу перехідних процесів порівняно з класичною системою збудження [12]. На жаль, немає відомостей про розробку хоча б пробного зразку такого регулятора.

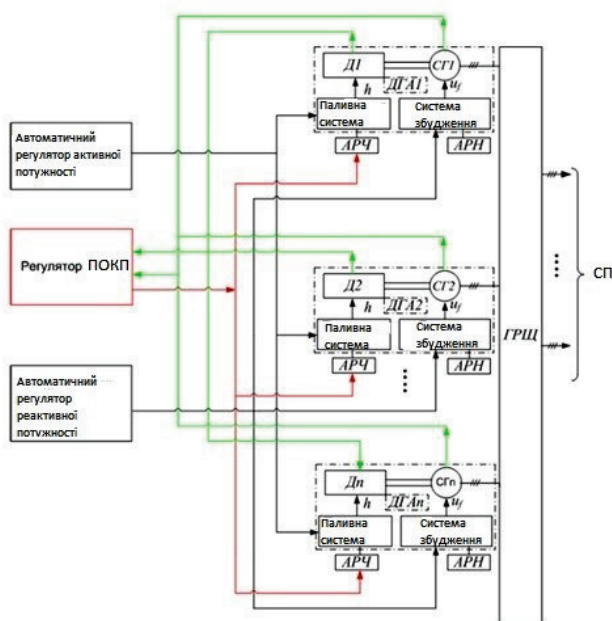


Рис. 6. Блок-схема АСУ СЕЕС із блоком ПОКП [11]

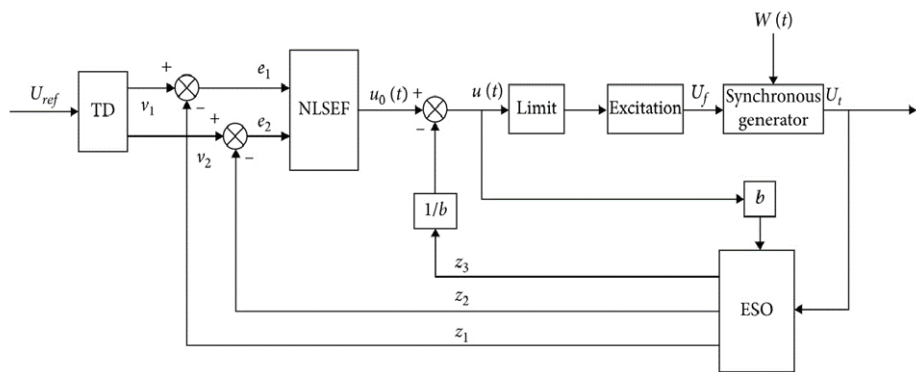


Рис. 7. Блок-схема включення контролера активного керування придушенням переходу у систему збудження СГ [12]

Наступною частиною СЕЕС суден з ГЕУ, за рахунок якої можливо поліпшити динамічні характеристики, є ГРЩ чи їхня сукупність. Або, якщо точніше, повернення до використання постійного струму [13]. Він може застосовуватися для живлення частини судових споживачів і тоді говорять про «мікромережі постійного струму» [6], які живлять від силових випрямлячів через локальні розподільні щити (РЩ) або ГРЩ повністю переводиться на постійний струм [13, 14], причому генератори, пропульсивний комплекс та основна частина судових споживачів залишаються на змінному струмі (рис.8).

Це досягається включенням силових випрямлячів до фідерних ліній генераторів перед ГРЩ і, відповідно, інверторів в кабелі живлення навантажень після ГРЩ. З переваг такої архітектури побудови ЕЕС зазначають такі:

- Підвищення ефективності первинного двигуна та зниження витрат на паливо,
- Економія ваги та простору,
- Генератори, що працюють з коефіцієнтом потужності, рівним одиниці,
- Зниження втрат під час передачі енергії,
- Більш швидке та просте паралельне з'єднання генераторів,
- Простіша реалізація накопичення енергії. Поліпшення динамічних характеристик СЕЕС з ГРЩ постійного струму відбувається через відсутність необхідності підтримки однакової частоти обертання первинних двигунів і, отже, провалів частоти мережі, що виникають. Крім цього, вирішується проблема дефіциту потужності, що виникає при різких начерках навантаження. На сучасному етапі все частіше використовуються так звані судна з гібридними ЕЕС, у яких поряд із класичними первинними двигунами (дизелями та турбінами) використовуються паливні елементи, вітрогенератори, накопичувачі енергії на основі літій-іонних акумуляторів [14]. За наявності шин постійного струму інтеграція додаткових джерел енергії в ЕЕС не складе великих зусиль. Згадані вище пристрої застосовуються в основному для вирішення завдань зменшення викидів в атмосферу, економії палива і т.п. Для покращення динамічних характеристик цікаві іоністори або суперконденсатори (Supercondensators) [15,16]. Вони мають відповідні характеристики для покращення стабільності СЕЕС при перехідних процесах, приклад гібридної енергетичної системи електроходу з іоністором представлений на рис. 9.

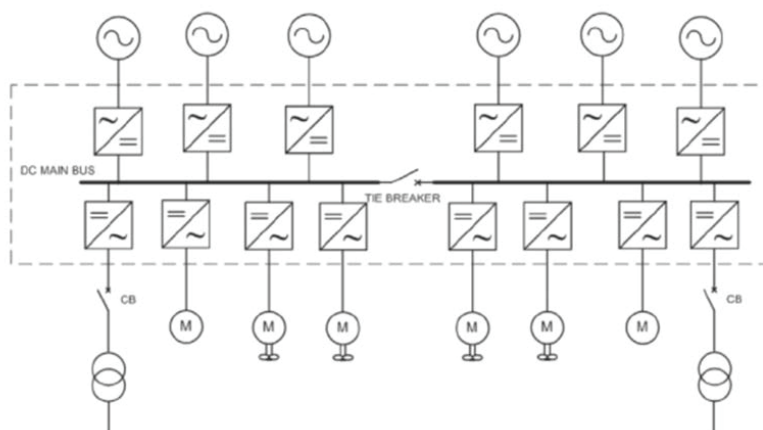


Рис. 8. Приклад побудови СЕЕС із ГРЩ постійного струму [13]

Однак промислове застосування іоністорів як накопичувачів джерел енергії для пропульсивних комплексів залишається перспективою, дослідження в цій галузі знаходяться на стадії теоретичних розробок та моделювання.

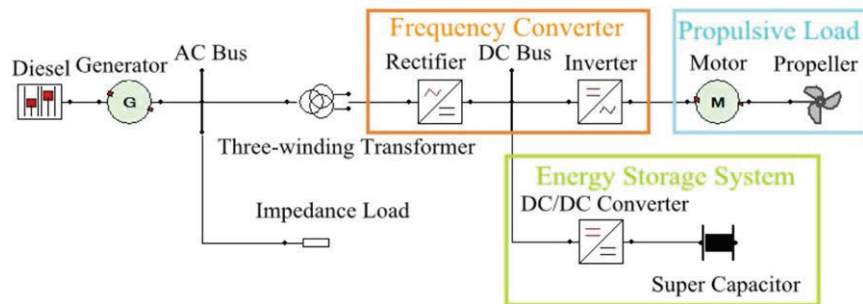


Рис. 9. Схема СЕЕС електрохода з використанням іоністора [15]

Розвиток силових напівпровідникових елементів дав можливість розробки частотних перетворювачів (ЧП) та впровадження їх як джерела живлення гребних електродвигунів на судах. Після початку застосування тиристорів наприкінці 1950-х років елементна база ЧП суттєво розширилася і продовжує розвиватися, але основними елементами залишаються діоди, тиристори та IGBT-транзистори [17]. Серед найбільш відомих топологій НП можна виділити такі: випрямлячі, циклоконвертери, синхроконвертери та ШІМ-інвертери (рис.10). Керовані випрямлячі застосовуються як джерела живлення двигунів постійного струму малої потужності (до 5 МВт) і, як наслідок, вони не застосовуються для суднових ГЕУ на змінному струмі. В якості джерел живлення синхронних двигунів застосовуються цикло- та синхроконвертери. Циклоконвертери зазвичай застосовуються в ГЕУ криголамів або суден із системами динамічного позиціонування (ДП) через їхню здатність зберігати високі значення крутного моменту при низьких швидкостях ГЕД.

Циклоконвертери допускають вхідні сигнали з фіксованою амплітудою та частотою і перетворюють їх у вихідні сигнали змінної амплітуди та частоти з низькою частотою перемикання та без внутрішньої шини постійного струму. Недоліком такої схеми є той факт, що частота мережі на виході ЧП не може бути вищою за вхідну [17]. На інших типах суден із синхронними двигунами, які не вимагають подібних характеристик, можуть застосовуватися синхроконвертери, що мають менші розміри, простіші контролери управління, кращі характеристики щодо спотворення параметрів мережі через спектр вищих гармонік. Синхроконвертери містять керований тиристорний випрямляч, індуктивний ланцюг постійного струму і тиристорний інвертор, який працює як інвертор джерела струму. Швидкістю двигуна можна керувати, регулюючи частоту вихідного струму, а крутний момент і потужність регулюються зміною напруги на шині постійного струму. Завдяки тому, що робота випрямляючого та інвертуючого щаблів може виконуватися незалежно і з достатньою швидкістю, зміна швидкості обертання гребних гвинтів та їх реверс відпрацьовуються також досить швидко. Однак через застосування тиристорів та їхню невисоку швидкість перемикання крутний момент двигуна може мати биття на низьких обертах [17]. Більш універсальним типом ЧП є перетворювачі, що використовують принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони можуть застосовуватися для керування як синхронними, так і асинхронними двигунами та асинхронними двигунами з постійними магнітами.

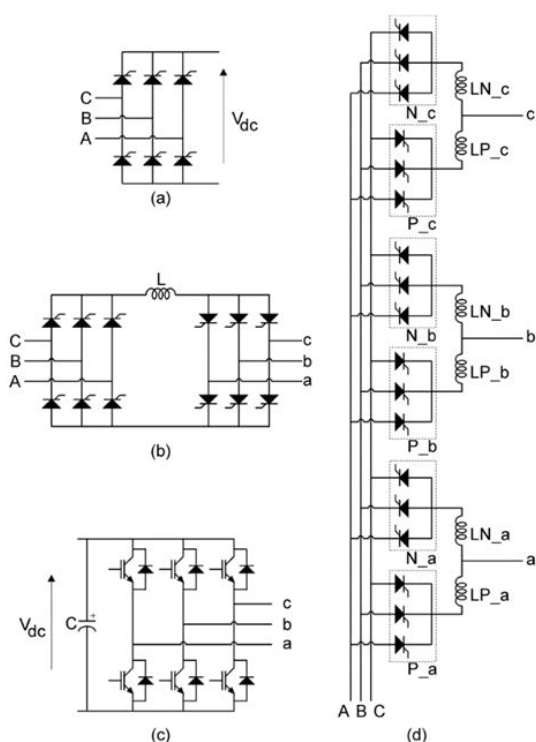


Рис. 10. Керований випрямляч (а), синхроконвертор (b), ШІМ-інвертор (с), циклоконвертор (d) [17]

ЧП з ШІМ засновані на силових пристроях з керованим вимкненням, таких як IGBT транзистори, які здатні працювати на більш високих частотах, ніж перетворювачі на основі тиристорів. Типовий перетворювач із ШІМ складається з мостового діодного випрямляча який є вхідним каскадом, ємнісної ланки постійного струму та вихідного інвертора. Діодний випрямляч можна замінити випрямлячем з ШІМ-контролером, щоб покращити електричні характеристики вхідного каскаду приводу, що дозволяє уникнути використання великих пасивних фільтрів гармонік. Амплітудою і частотою вихідної напруги можна керувати, а за рахунок високочастотного перемикавання можна точно і плавно регулювати крутний момент двигуна. Робочі характеристики приводу зберігаються у всьому діапазоні доступних амплітуд та частот напруги [17].

Щодо питання подальшого розвитку НП з погляду поліпшення динамічних показників цікаві ті, які зменшують недоліки існуючих ЧП. Основною проблемою частотних перетворювачів є спотворення ними параметрів мережі живлення за рахунок виникнення вищих гармонік напруги і струму. Елементна база силових пристроїв з карбїду кремнію (SiC) швидко розвивається [18], і різні дослідження показують перші результати її застосування в силових пристроях. Частоти перемикавання пристроїв на елементах із SiC можуть бути у 100 разів вищими, ніж у звичайних Si – що збільшить швидкодїю ЧП, а опір провідності у 100 разів нижчий,

що як відомо, є одним із шляхів зниження емісії вищих гармонійних складових струму. Ще однією перевагою перетворювачів на основі карбїду кремнію є можливість роботи з вищими напругами, і, як наслідок, більш швидкі та ефективні силові пристрої можуть стати комерційно доступними в найближчому майбутньому [18]. Наступним шляхом модернізації ПП є дослідження у сфері нових топологій перетворювачів потужності, у тому числі, ймовірно, найцікавішими з погляду застосування у майбутніх ГЭУ є багаторівневі, матричні і багатофазні перетворювачі [17]. Принцип роботи багаторівневих перетворювачів полягає у генерації різних напруг на шині постійного струму для покращення якості форми сигналу змінної напруги. У свою чергу багаторівневі перетворювачі пропонуються трьох видів: перетворювачі з діодними снабберами, з «літаючими» конденсаторами і послідовні каскадні перетворювачі [17]. Усі запропоновані рішення мають на меті зменшення гармонійних спотворень вихідного сигналу змінного струму. У свою чергу для управління вищезазначеними топологіями розробляються такі алгоритми управління: низькочастотний ШПМ, високочастотний ШПМ, гібридний [17]. У першому випадку кожен перемикач, що складається з IGBT-транзистора та FWD-діода, перемикається один раз на основній частоті змінного струму. Як наслідок, потрібна більша кількість рівнів для мінімізації вихідних гармонійних спотворень. У разі роботи високочастотної ШПМ доступні різні методи, найбільш цікавим підходом є метод зсуву несучої частоти, який мінімізує гармонічні спотворення на виході у разі рівної напруги постійного струму. Гібридний алгоритм багаторівневого перетворювача передбачає, що один перетворювач, що складається з IGCT, перемикається на низькій частоті, а другий високочастотний ШПМ-перетворювач очищує гармонійний спектр першого [17].

Матричні перетворювачі складаються з масиву двонаправлених перемикачів $m \times n$, де m і n – кількість вхідних та вихідних фаз відповідно, що дозволяє змінювати стан з'єднання вхідних та вихідних фаз. Алгоритм управління для даної топології досить складний, крім того, при проектуванні перетворювача необхідно враховувати різні практичні питання, такі як вхідний пасивний фільтр для компенсації реактивної потужності або снаббери для запобігання перенапруг під час роботи перетворювача. Амплітуда та частота для низькочастотних складових вихідних напруг матричного перетворювача вимагає підбору відповідного методу модуляції, що є недоліком даного типу ЧП [17].

Багатофазні перетворювачі використовуються для живлення багатофазних асинхронних двигунів. Такі двигуни мають більшу надійність, ніж звичайні трифазні, і, як наслідок, можуть успішно застосовуватися в ГЭУ. Багатофазні перетворювачі використовують загальну шину постійного струму та включають стільки гілок, що складаються з двох або більше (багаторівневих) перемикачів, скільки фаз у керованого двигуна. Слід враховувати, що 3-фазні інвертори можуть розглядатися як окремий випадок багатофазної топології, і методи модуляції, що застосовуються до трифазних інверторів, такі як синусоїдальна або просторово-векторна ШПМ, можуть бути поширені на багатофазні перетворювачі.

Що стосується електродвигунів, незважаючи на те, що їхня частка в загальному навантаженні, включаючи ГЭД, підрулюючі пристрої, насоси та інше, становить 80-90%, кількість видів дуже обмежена і представлена в основному асинхронними

(індукційними) двигунами. Додавши сюди двигуни постійного струму та синхронні машини отримаємо повну лінійку ГЕД на сучасних судах-електроходах. Умовно їх застосування можна розмежувати за потужністю. Двигун постійного струму повинен отримувати живлення від джерела постійного струму, а оскільки виробництво та розподілення електроенергії трифазне, двигун постійного струму повинен жити від випрямляча з тиристорним керуванням, який також забезпечує регулювання швидкості. Витрати, технічне обслуговування і технологічні обмеження лімітують застосування двигунів постійного струму 5ма МВт [17]. Асинхронні або індукційні двигуни можуть бути безпосередньо підключені до електричної мережі і, отже, працювати з постійною швидкістю або можуть жити від циклоконвертера або ШПМ-інвертора, щоб отримати регулювання швидкості. Найбільш економічно ефективні у діапазоні потужностей до 5-10 МВт [17]. Синхронні машини використовуються у великих гребних приводах, зазвичай >5 МВт у конфігураціях з прямим підключенням до гребного гвинта і >8-10 МВт у разі підключення через редуктор [17].

У питанні вдосконалення ГЕД саме синхронні машини мають найвищий потенціал. Насамперед можна виділити синхронні двигуни з постійними магнітами (ПМ), перші приклади їх використання на судах вже відомі [19].

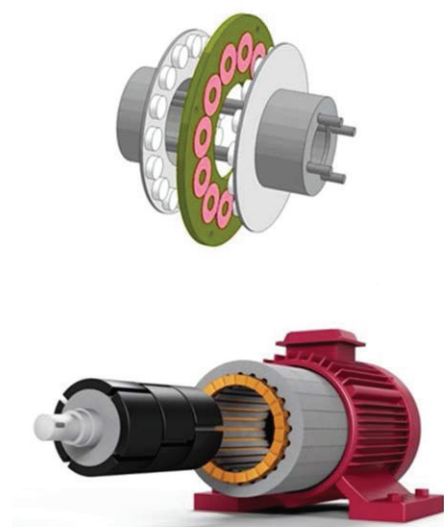


Рис. 11. Приклади синхронних двигунів із постійними магнітами [19]

Компанії ABB, Siemens, DRS Technologies та інші вже випускають такі лінійки промислових зразків електродвигунів цього типу. Конструкційною особливістю ЕД з ПМ є застосування постійних магнітів замість обмотки збудження, розташованої на роторі електричної машини. Приклади такого конструювання представлені на рис. 11. З переваг СЕД з ПМ слід зазначити такі:

- велика енергетична густина;
- високий ККД (до 99,3%);

- спрощена система охолодження;
- поліпшені експлуатаційні характеристики;
- стійкість до коливань напруги у мережі.

Іншим шляхом удосконалення СЕД є впровадження технологій, пов'язаних із надпровідниками. Дослідження в галузі матеріалів з меншими електричними втратами, відомих як надпровідні дроти [14, 19] дозволили підвищити ефективність і щільність потужності машин, що обертаються, при одночасному зниженні їх розмірів і ваги.

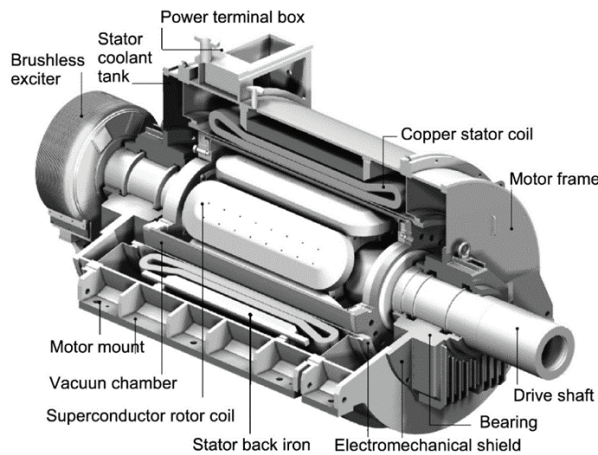


Рис. 12. Прототип 5 МВт синхронного електродвигуна з використанням технології ВТС компанії American Superconductor [17]

Існує два основних типи надпровідників: низькотемпературний надпровідник (НТС) з робочою температурою близько 10 К та високотемпературний надпровідник (ВТС), де робоча температура вище 100 К [19]. Через низьку температуру обидві технології вимагають системи охолодження, а у випадку з проводами НТС вона менша і простіша. Слід враховувати, що енергоспоживання цих холодильників залежить від потужності генератора або двигуна. Залежно від обраного надпровідникового матеріалу та конфігурації двигуна було запропоновано різні дослідницькі прототипи цих електричних машин, але перші комерційно доступні приклади засновані на синхронних двигунах на базі ВТС фірми American Superconductors, Inc [19]. Ці двигуни більш енергоємні, тихіші, легші і менші, ніж еквівалентні машини традиційної конструкції. Компанія American Superconductors, Inc. розробила два синхронні двигуни ВТС потужністю 5 МВт (рис. 12) та 36,5 МВт для ВМС США. Компанія Siemens також розробила прототипи електричних машин на основі ВТС для суднових установок.

Удосконалення систем управління та контролю ЕЕС суден-електроходів з метою покращення їх динамічних характеристик, безпеки та показників технічної експлуатації також є предметом досліджень і часто згадується у світових літературних джерелах. Як уже згадувалося, система управління є багаторівневою,

нижчий рівень якої займають локальні регулятори обертів первинних двигунів, системи збудження та автоматичного регулювання напруги генераторів і модулі керування частотних перетворювачів живлення ГЕД, а верхній поєднує різні функції в межах «системи управління живленням» (PMS) [5]. Оновленням підлягають всі частини системи управління, наприклад, загальними тенденціями розвитку автоматичних регуляторів частоти обертання є перехід від електромеханічних моделей до повністю електронних пристроїв [20]. Іншою характерною особливістю удосконалень є застосування замість або на додаток до класичних ПД або П+І регуляторів різних контролерів або алгоритмів керування [21,22]. Зокрема, для поліпшення характеристик АРЧ пропонується запровадити управління з прогнозуючою моделлю дизеля з лінійними спостерігачем у ланцюзі зворотнього зв'язку [21]. Ще одним із досліджень пропонується побудова регулятора частоти обертання дизеля на принципах нечіткої логіки з використанням алгоритму оптимізації рою частинок [22].

Удосконалення регуляторів напруги синхронних генераторів у плані поліпшення динаміки ЕЕС пов'язано, як згадувалося на початку статті, з форсуванням збудження СГ при накидах навантаження, як описано в [6,8,9].

Повертаючись до питання локальних регуляторів ЧП ГЭД, слід зазначити, що сучасні регулятори реалізуються з урахуванням мікропроцесорної техніки. В основі їх лежать класичні схеми замкнених ПІ та ПД регуляторів із зворотним зв'язком, які постійно вдосконалюються та мають деякі особливості залежно від типу ГЕД, що живиться від конкретного ЧП. Оскільки судна з ГЭД постійного струму нині мало будуються, основні типи їх, застосовувані на судах – синхронні і асинхронні двигуни змінного струму [23]. Всі СУ ЧП ГЭД побудовані на векторному принципі, що дозволяє домагатися необхідних значень обертаючого моменту на валу ГЭД і його швидкості обертання у всьому діапазоні регулювання. Умовно СУ ПП можна розділити на кілька взаємозалежних частин, наявність яких визначається топологією самого ЧП [23]. Як правило, статичний перетворювач частоти включає некерований або керований випрямляч зі своїм контролером, внутрішню шину постійного струму, на якій організовані ланцюги з опорами навантаження для режимів рекуперації ГЕД, також зі своїми контролерами і автономні інвертори, які відповідно мають свої керуючі підсистеми для забезпечення відкриття комутаційних ключів. До складу СУ ЧП можуть входити допоміжні регулюючі пристрої контролю активних фільтрів або, наприклад, підсистем обмеження динамічного навантаження [23]. Як зазначалося раніше, кількість можливих топологій для інверторів постійно зростає [17] і кількість запропонованих удосконалень їх СУ відповідно пропонується дедалі більше. Наприклад, МРС-регулятор із застосуванням прогнозуючої моделі (Model predictive control) запропонований для живлення ЧП гребного асинхронного двигуна. За твердженням авторів, даний тип регулятора дозволяє домогтися зменшення пульсацій крутного моменту на валу ГЭД і зменшення кількості перемикачів ключів інвертора [24]. Наступним варіантом удосконалення СУ ЧП є введення в її регулятор генератора хаотичних сигналів (Chaos-Based Generator), вихідний сигнал якого поєднується з основним сигналом управління і потім сумарний сигнал надходить у ланцюг управління ключами інвертора. Автори стверджують про зменшення рівня перешкод на 20Дб

у вихідному ШІМ-сигналі, що надходить на АД [25]. Ще одним прикладом удосконалення систем управління частотних перетворювачів живлення АД є наступна запропонована конфігурація для матричних перетворювачів інверторів. Її особливість – введення в структуру звичайного ПІ регулятора контуру управління, побудованого на засадах нечіткої логіки. Метою такого апгрейду є зменшення коефіцієнта гармонійних спотворень THD (Total Harmonics Distortion) напруги та струму у вхідних та вихідних ланцюгах ЧП [26]. Підсумовуючи, можна констатувати, що сучасні розробки, що стосуються СУ ЧП ГЕД електроходів, здебільшого присвячені покращенню якості показників суднової мережі та зменшенню присутності в ній складових вищих гармонік, як з боку живлення ЧП, так і з боку навантаження.

Усі вищезгадані регулятори у відповідність до різних джерел, наприклад, [6] утворюють первинний рівень управління (рис.2). Однак, у зв'язку з подальшим розвитком ЕЕС, збільшенням їх сумарної потужності, збільшенням частки пропульсивних навантажень, які можуть досягати 90% їх обсягу, а також появою так званих імпульсних навантажень PPL (pulse power loads), тобто. навантажень дуже великої потужності, що тривають дуже короткий час – секунди або мілісекунди (такі навантаження характерні для військових кораблів насамперед), виникає проблема вдосконалення систем керування ЕЕС електроходів [5]. Для створення СУ, які задовольняли б нові запити, використовується досвід проектування наземних автономних електричних мереж або мікромереж та електричних транспортних засобів [27]. Потенційним рішенням синтезу нових СУ можливо використання ієрархічної схеми управління [6]. У такій схемі регулювання можна оперувати за допомогою кількох рівнів керування, як показано на рис. 2. У такому разі говорять про стратегію управління, яка є кращою, оскільки вводить незалежну поведінку між різними рівнями управління. Таким чином, функції оптимізації та стабілізації енергосистеми можуть бути досягнуті одночасно, особливо для ізольованих систем із кінцевою генерацією та інерцією [6]. Верхній рівень ієрархічної суднової системи управління електроенергетичною установкою електроходів зазвичай реалізується в рамках системи управління потужністю або Power Management System (PMS), показаної на рис.2, яка виконує вторинне управління уставками швидкості та напруги, щоб підтримувати їх значення в робочих межах системи під час динамічних режимів роботи ЕЕС [5]. Наприклад, через спад напруги частота електричної мережі також буде зменшуватися зі збільшенням навантаження. PMS може (повільно) збільшувати уставку, щоб компенсувати спад та підтримувати частоту мережі на заданому рівні [6].

Більш того, під час зміни навантаження PMS забезпечує автоматичний запуск і зупинку резервних генераторних установок і контролює навантаження так, щоб двигуни не були перевантажені, обмежуючи за рахунок алгоритмів обмеження динамічного навантаження тягові моменти ГЕД і відключаючи другорядні споживачі при необхідності. Нарешті, PMS може виконувати функції захисту, такі як запобігання блекаутам, відключення несправних частин системи та переналаштування електричної мережі після вимкнення електроенергії. Стратегія управління, реалізована в PMS, отримала назву стратегії, що ґрунтується на (логічних) правилах. Управління з урахуванням (логічних) правил – це тип управління

енергоспоживанням судна, який спирається на людський досвід (інженерні знання), евристику, інтуїцію і навіть математичні моделі [28]. Він також використовує інформацію, зібрану під час раніше виконаних рейсів та стратегії вирівнювання навантаження. Рішення про розподіл потужності в кожний момент часу ґрунтуються на наборі визначених правил. Ці стратегії можуть бути реалізовані за участю оператора у режимі реального часу. Вони статичні, тому вибір робочих точок компонентів вимагає наявності відповідних таблиць або діаграм, щоб найкращим чином задовольнити потребу в потужності судна в конкретному режимі. Рішення приймаються миттєво на основі даних, що знімаються датчиками у конкретний момент часу. Надалі засновані на логічних правилах стратегії отримали свій розвиток і сьогодні розрізняють дві їх категорії – стратегії засновані на детерміністичних методах, і засновані на нечітких правилах [28].

З появою суден з гібридною силовою установкою, що використовують поряд із звичайними первинними джерелами енергії – дизель-генераторами, нові: паливні елементи, вітрогенератори, акумулятори та ін., стратегії оптимізації спільного використання джерел енергії вимагали створення третього рівня управління, відомого як система управління енергією (Energy Management System – EMS) [5,6]. Оскільки в частині управління динамічними процесами, всі підзадачі реалізуються на первинному та вторинному рівнях управління – у системах стабілізації частоти та напруги та PMS, розглянемо тенденції розвитку саме для цих систем.

Зокрема, у роботі [29], що ґрунтується на великій базі попередніх експериментів та теоретичних досліджень широкого кола авторів, запропоновано концепцію інтегрованої з PMS системи управління відмовами та знеструмленням з підвищеною надійністю. Її суть у застосуванні додаткових розподілених контролерів, включених до стандартної PMS ЕЕС електроходу, як показано на рис. 13.

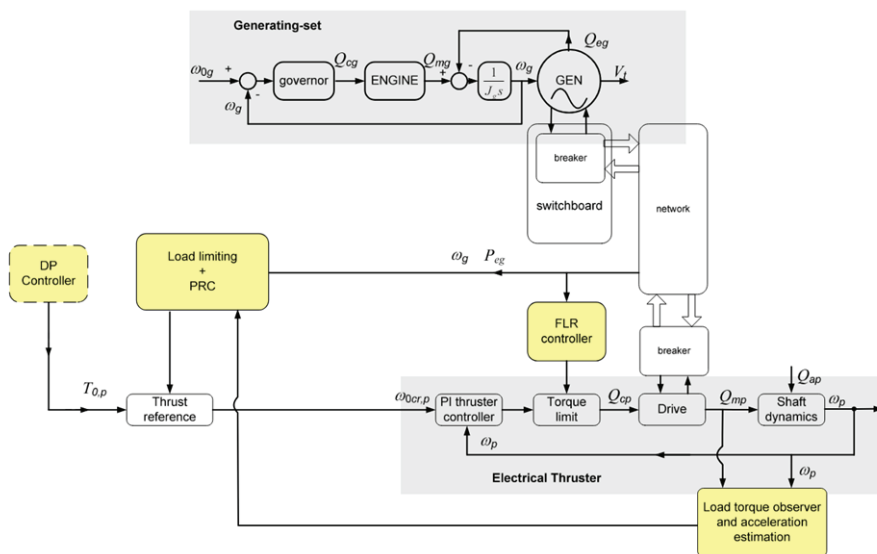


Рис. 13. Інтегрована з PMS система управління відмовами та знеструмленням підвищеної надійності [29]

Розподілені контролери виділені жовтим і є наступними:

Контролер перерозподілу потужності та управління обмеженням навантаження Load limiting + PRC (Power redistribution controller) перерозподіляє потужність між споживачами (трастерами), які генерують коливання навантаження. Обмеження навантаження на трастери здійснюється відстеженням сигналів про стан автоматичних вимикачів генераторів, перемичок розподільних щитів, потужних споживачів. Контролер також використовує відхилення частоти мережі, розрахункові значення втрати тяги на гвинті, а також опосередковані показники коливань мережного навантаження як вхідні сигнали.

Контролер управління розподілом тяги (Load torque observer and acceleration estimation) реалізує існуючі алгоритми розподілу тяги з чутливістю до коливань швидкості гвинта. Таким чином, задана тяга на трастері, що погано працює, буде зменшена і перерозподілена на інші трастери.

Контролер швидкого зниження навантаження FLR (Fast Load Reduction) реалізований на основі алгоритму спостерігача, здатного розпізнавати відключення генератора за вимірюванням частоти мережі та потужності (струму, напруги). Цей контролер незалежний від PMS та дублює попередній, з більш високою швидкістю. Головною особливістю концепції інтегрованого управління є те, що уникають проблеми із затримками зв'язку та збоями, а кількість датчиків та зв'язку між контролерами зводиться до мінімуму. Більше того, оскільки управління розподілене в енергосистемі, досягається високий рівень надмірності та надійності, тобто стійкість до збоїв та відключень живлення.

Слабкими сторонами даної пропозиції є те, що процес змін параметрів мережі прийнято квазістатичним, а динамічні обурення розглядаються як шум. Регулювання виконується за випадку активної системи динамічного позиціонування, що обмежує застосування даних контролерів певними режимами роботи судна.

Результати досліджень. За підсумками огляду серед основних тенденцій, що визначають розвиток СЕЕС електроходів можна назвати застосування нових джерел енергії, збільшення загальної потужності установок та енергетичної щільності їх окремих складових частин, поява потужних короточасних імпульсних навантажень, відмова від електромеханічних вузлів автоматики на користь електронних пристроїв. З іншого боку, проблеми обмінних коливань у багатоагрегатних судових електростанціях, випадкові відключення СЕЕС під час динамічних процесів, погіршення якості електроенергії в судових електромережах за рахунок присутності вищих гармонійних складових, зумовлених застосуванням потужних статичних напівпровідникових перетворювачів, ще чекають на своє остаточне рішення. При моделюванні динамічних режимів у деяких джерелах використовуються математичні моделі з лінеаризованими рівняннями, без урахування нелінійностей, властивості яких елементи СЕЕС набувають під час динамічних навантажень. Також використовуються моделі з одиничними генеруючими агрегатами, при цьому впливом обмінних коливань нехтують. Не вдалося знайти досліджень, присвячених реакції автоматичних регуляторів на зміну стану первинних двигунів внаслідок відмов і несправностей. Більшість пропонує шляхів поліпшень динамічних характеристик матеріало- та трудомісткі, вимагають значних проміжків часу для впровадження та підходять для перспективних типів електроходів.

Висновки. За визнанням авторів опрацьованих статей, існує низка проблем для СЕЕС електроходів, що виникають під час динамічних процесів. Для їх вирішення необхідно розробити математичну модель СЕЕС з урахуванням нелінійних властивостей частин системи, що виявляються в перехідних режимах. Після перевірки та проведення експерименту з моделлю потрібно розробити адаптивний регулятор із включенням до числа вхідних сигналів його такого, який відображав би технічний стан первинного двигуна. Створення такого регулятора дозволить судам з електрорухом оптимально проходити динамічні обурення за критеріями безпеки, економічності та енергоефективності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hai-chun Niu, Mei-lian Zhao, Fu-zhen Qin. Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development. In: 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017). Atlantis Press, 2017. Volume 112. DOI: <https://www.atlantis-press.com/article/25876778.pdf>
2. Espen Skjong, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, Joseph Cunningham. The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day. In: IEEE PROCEEDINGS 2015. DOI: https://folk.ntnu.no/torarnj/IEEE_Proceedings_Skjong_2015.pdf
3. П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е.И. Зарицкая. Вплив загальносуднових споживачів електроенергії на оптимальне управління гребними електричними установками // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 75-82. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.
4. Hiroyasu Kifune, Mehdi Zadeh. Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption. In: July 2019 Marine Engineering 54(4):576-581, DOI:10.5988/jime.54.576
5. R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Department of Maritime & Transport Technology, Delft University of Technology, The Netherlands, Applied Energy Volume 194, 15 May 2017, Pages 30-54. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.02.060
6. Guerrero, Josep M.; Jin, Zheming; Liu, Wenzhao; Bin Othman @ Marzuki, Muzaidi; Savaghebi, Mehdi; Anvari-Moghaddam, Amjad; Meng, Lexuan; Quintero, Juan Carlos Vasquez. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. In Proceedings of PCIMASIA 2016. (pp. 135-142). VDE Verlag GMBH. https://www.researchgate.net/publication/308050733_Shipboard_Microgrids_Maritime_Islanded_Power_Systems_Technologies
7. Веретенник А.М., Аболешкин С.Е. Современный дизель-генератор – источник энергии судовой электростанции. Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 28. – Одесса: ОНМА, 2011. Стр.133-145. УДК 621.436.12

8. Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo, Erick F. Alves. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends. August 2019 IEEE Access 7(1):109699-109718. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2933493
9. J. Dai, S. Hagen, D. C. Ludois, and I. P. Brown, Synchronous generator brushless field excitation and voltage regulation via capacitive coupling through journal bearings, IEEE Trans. Ind. Appl., vol.53, no.4, pp. 33173326, Jul. 2017. DOI:10.1109/TIA.2017.2681621
10. Савенко А. Е. Исследование обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов / А. Е. Савенко // Материалы 19 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2012”. – Киев, 2012. – С. 251–252.
11. Савенко А. Е. Метод уменьшения обменных колебаний мощности при управлении параллельной работой судовых дизель генераторных агрегатов / А. Е. Савенко // Материалы 20 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2013”. – Николаев, 2013. – С. 271–272.
12. Rongjie Wang, Xiangyu Liu, Yuyuan Huang. Synchronous Generator Excitation System for a Ship Based on Active Disturbance Rejection Control. <https://doi.org/10.1155/2021/6638370>
13. Kyunghwa Kim, Kido Park, Gilltae Roh & Kangwoo Chun (2018) DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations, Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 2:1, 1-12, DOI: 10.1080/25725084.2018.1490239
14. Zhuk, D.; Zhuk, O.; Kozlov, M.; Stepenko, S. Evaluation of Electric Power Quality in the Ship-Integrated Electrical Power System with a Main DC Bus and Power Semiconductor Electric Drives as Part of the Electric Propulsion Complex. Energies 2023, 16, 2961. <https://doi.org/10.3390/en16072961>
15. Peng Bao, Wanting Wang. Stability Improvement of Electric Ship Propulsion System Using Supercapacitor. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2030, 2021 International Conference on Electrical Engineering and Computer Technology (ICEECT 2021) 20-22 August 2021, Qingdao, China. DOI 10.1088/1742-6596/2030/1/012006
16. Wenjie Chen, Alf Kare Adnanses, Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjorn, Tianhao Tang. Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, 06-08 September 2010. DOI: 0.1109/ICELMACH.2010.5607967
17. Victor M. Moreno, Alberto Pigazo. Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. Journal of Maritime Research, Vol. IV. No. 2, pp. 81-100, 2007. Printed in Santander (Spain). ISSN: 1697-4840.
18. Elasser A., Kheraluwala M. H., Ghezzi M. H., Steigerwald R. L., Evers N. A., Kretchmer J., Chow T. P. A comparative evaluation of new silicon

- carbide diodes and state-of-the-art silicon diodes for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (4) (2003), 915-921. DOI:10.1109/TIA.2003.813730
19. Bassham, Bobby A. An evaluation of electric motors for ship propulsion. Theses and Dissertations. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2003-06. In: <http://hdl.handle.net/10945/1029>
 20. Ying Hu, Jianguo Yang, Nao Hu, Lei Hu, Zhengyan Qian, Yonghua Yu. Research and development of electronic speed control strategies for medium-speed marine diesel engines. August 2017, *International Journal of Engine Research*. Volume 19, Issue 5. DOI:10.1177/1468087417725005
 21. Tran, T.A. The Optimization of Marine Diesel Engine Rotational Speed Control Process by Fuzzy Logic Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *Future Internet* 2018, 10, 99. <https://doi.org/10.3390/fi10100099>
 22. H. Shu, X. Li, Y. Liu and R. Wang, «Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control,» in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49300-49318, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3270286
 23. The guide of Marine Frequency Converters marine EQUIPMENT. In: https://www.academia.edu/33141451/The_guide_of_Marine_Frequency_Converters_marine_EQUIPMENT
 24. Liu T, Yao X, Kou J. Enhanced Model Predictive Control for Induction Motor Drives in Marine Electric Power Propulsion System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12(3):378. <https://doi.org/10.3390/jmse12030378>
 25. Balestra Michele, Bellini Alberto, Callegari Sergio, Rovatti Riccardo, Setti Gianluca. (2004). Chaos-Based Generation of PWM-Like Signals for Low-EMI Induction Motor Drives: Analysis and Experimental Results. *IEICE Transactions on Electronics*. E87C.
 26. Jati Mentari, Era Purwanto, Sumantri Bambang, Rusli Muhammad, Nasuha Aris, Tjahjono Anang, Taufik Taufik. (2021). A Fuzzy Supervisory Scalar Control for Matrix Converter Induction Motor Drives. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 13. 203-217. DOI:10.15676/ijeei.2021.13.1.12
 27. Chua, L. W. Y. (2019). A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. <https://doi.org/10.32657/10220/48078>
 28. Panday, Aishwarya & Bansal, Hari. (2014). A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. In: https://www.researchgate.net/publication/316990426_A_Review_of_Optimal_Energy_Management_Strategies_for_Hybrid_Electric_Vehicle
 29. D. Radan. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor. Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology 2008. In: https://folk.ntnu.no/assor/PhD%20Thesis/Phd_Radan_NTNU.pdf

REFERENCES

1. Hai-chun Niu, Mei-lian Zhao, Fu-zhen Qin. Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development. In: 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017). Atlantis Press, 2017. Volume 112. DOI: <https://www.atlantis-press.com/article/25876778.pdf>
2. Espen Skjong, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, Joseph Cunningham. The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day. In: IEEE PROCEEDINGS 2015. DOI: https://folk.ntnu.no/torarnj/IEEE_Proceedings_Skjong_2015.pdf
3. P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya. Influence of ship consumers of electric energy on optimal control of electrical propulsion plants // Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion.» – Kharkiv : NTU «KhPI», 2019. – No. 4 (1329). – P. 75-82. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.
4. Hiroyasu Kifune, Mehdi Zadeh. Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption. In: July 2019 Marine Engineering 54(4):576-581, DOI:10.5988/jime.54.576
5. R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Department of Maritime & Transport Technology, Delft University of Technology, The Netherlands, Applied Energy Volume 194, 15 May 2017, Pages 30-54. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.02.060
6. Guerrero, Josep M.; Jin, Zheming; Liu, Wenzhao; Bin Othman @ Marzuki, Muzaidi; Savaghebi, Mehdi; Anvari-Moghaddam, Amjad; Meng, Lexuan; Quintero, Juan Carlos Vasquez. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. In Proceedings of PCIMASIA 2016. (pp. 135-142). VDE Verlag GMBH. https://www.researchgate.net/publication/308050733_Shipboard_Microgrids_Maritime_Islanded_Power_Systems_Technologies
7. Veretennik A.M., Aboleshkin S.E. Modern diesel generator – energy source of ship power plant. Ship power plants: scientific and technical collection. Issue 28. – Odessa: ONMA, 2011. Pp.133-145. UDC 621.436.12
8. Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo, Erick F. Alves. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends. August 2019 IEEE Access 7(1):109699-109718. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2933493
9. J. Dai, S. Hagen, D. C. Ludois, and I. P. Brown, Synchronous generator brushless field excitation and voltage regulation via capacitive coupling through journal bearings, IEEE Trans. Ind. Appl., vol.53, no.4, pp. 33173326, Jul. 2017. DOI:10.1109/TIA.2017.2681621
10. Savenko A. E. Study of exchange power oscillations during parallel operation of marine synchronous generators / A. E. Savenko // Proceedings of the 19th international conference on automatic control “Automation 2012”. – Kyiv, 2012. – P. 251–252.

11. Savenko A. E. Method for reducing exchange power fluctuations when controlling parallel operation of marine diesel generator units / A. E. Savenko // Proceedings of the 20th international conference on automatic control “Automation 2013”. – Nikolaev, 2013. – P. 271-272.
12. Rongjie Wang, Xiangyu Liu, Yuyuan Huang. Synchronous Generator Excitation System for a Ship Based on Active Disturbance Rejection Control. <https://doi.org/10.1155/2021/6638370>
13. Kyunghwa Kim, Kido Park, Gilltae Roh & Kangwoo Chun (2018) DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations, Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 2:1, 1-12, DOI: 10.1080/25725084.2018.1490239
14. Zhuk, D.; Zhuk, O.; Kozlov, M.; Stepenko, S. Evaluation of Electric Power Quality in the Ship-Integrated Electrical Power System with a Main DC Bus and Power Semiconductor Electric Drives as Part of the Electric Propulsion Complex. *Energies* 2023, 16, 2961. <https://doi.org/10.3390/en16072961>
15. Peng Bao, Wanting Wang. Stability Improvement of Electric Ship Propulsion System Using Supercapacitor. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2030, 2021 International Conference on Electrical Engineering and Computer Technology (ICEECT 2021) 20-22 August 2021, Qingdao, China. DOI 10.1088/1742-6596/2030/1/012006
16. Wenjie Chen, Alf Kare Adnances, Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjorn, Tianhao Tang. Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, 06-08 September 2010. DOI: 0.1109/ICELMACH.2010.5607967
17. Víctor M. Moreno, Alberto Pigazo. Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. Journal of Maritime Research, Vol. IV. No. 2, pp. 81-100, 2007. Printed in Santander (Spain). ISSN: 1697-4840.
18. Elasser A., Kheraluwala M. H., Ghezzi M. H., Steigerwald R. L., Evers N. A., Kretschmer J., Chow T. P. A comparative evaluation of new silicon carbide diodes and state-of-the-art silicon diodes for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (4) (2003), 915-921. DOI:10.1109/TIA.2003.813730
19. Bassham, Bobby A. An evaluation of electric motors for ship propulsion. Theses and Dissertations. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2003-06. In: <http://hdl.handle.net/10945/1029>
20. Ying Hu, Jianguo Yang, Nao Hu, Lei Hu, Zhengyan Qian, Yonghua Yu. Research and development of electronic speed control strategies for medium-speed marine diesel engines. August 2017, International Journal of Engine Research. Volume 19, Issue 5. DOI:10.1177/1468087417725005
21. Tran, T.A. The Optimization of Marine Diesel Engine Rotational Speed Control Process by Fuzzy Logic Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *Future Internet* 2018, 10, 99. <https://doi.org/10.3390/fi10100099>

22. H. Shu, X. Li, Y. Liu and R. Wang, «Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control,» in IEEE Access, vol. 11, pp. 49300-49318, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3270286
23. The guide of Marine Frequency Converters marine EQUIPMENT. In: https://www.academia.edu/33141451/The_guide_of_Marine_Frequency_Converters_marine_EQUIPMENT
24. Liu T, Yao X, Kou J. Enhanced Model Predictive Control for Induction Motor Drives in Marine Electric Power Propulsion System. Journal of Marine Science and Engineering. 2024; 12(3):378. <https://doi.org/10.3390/jmse12030378>
25. Balestra Michele, Bellini Alberto, Callegari Sergio, Rovatti Riccardo, Setti Gianluca. (2004). Chaos-Based Generation of PWM-Like Signals for Low-EMI Induction Motor Drives: Analysis and Experimental Results. IEICE Transactions on Electronics. E87C.
26. Jati Mentari, Era Purwanto, Sumantri Bambang, Rusli Muhammad, Nasuha Aris, Tjahjono Anang, Taufik Taufik. (2021). A Fuzzy Supervisory Scalar Control for Matrix Converter Induction Motor Drives. International Journal on Electrical Engineering and Informatics. 13. 203-217. DOI:10.15676/ijeei.2021.13.1.12
27. Chua, L. W. Y. (2019). A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. <https://doi.org/10.32657/10220/48078>
28. Panday, Aishwarya & Bansal, Hari. (2014). A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. In: https://www.researchgate.net/publication/316990426_A_Review_of_Optimal_Energy_Management_Strategies_for_Hybrid_Electric_Vehicle
29. D. Radan. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor. Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology 2008. In: https://folk.ntnu.no/assor/PhD%20Thesis/Phd_Radan_NTNU.pdf

ОЦІНКА РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН ЗА КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ ЇХ КОРПУСІВ

О.М. Шумило

к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

Анотація

Вступ. Всесвітній круїзний ринок показує впевнене зростання. Це спонукає судноплавні компанії розробляти і реалізовувати стратегії щодо збільшення пасажиромісткості флоту, однією з яких є модернізація існуючих суден.

Модернізація, що зосереджується на збільшенні розмірів, – розмірна модернізація – повинна узгоджуватися з різними моделями забезпечення ефективності експлуатації судна: безпеки судна і судноплавства, функціональності й економічної ефективності.

Одним з основних факторів, що впливає на безпеку судна і судноплавства, є забезпечення міцності корпусу, якому Класифікаційні товариства надають надважливого значення. Провідні класифікаційні товариства світу, що входять до Міжнародної асоціації класифікаційних товариств, розробили універсальні умови для забезпечення подовжньої міцності корпусу, до яких долучився Регістр судноплавства України. Одним із ключових чинників, що забезпечує ці умови, є довжина судна.

Визначення оптимальної довжини судна і розміру циліндричної вставки становить велику проблему, рішенням якої є створення ґрунтовної математичної моделі модернізації судна, яка включає підмоделі безпеки судна, його функціональності й економічної ефективності. Ця математична модель має цільову функцію, виражену показниками економічної ефективності, всі інші підмоделі дають обмеження до цієї функції.

Одним із таких обмежень є максимальна довжина, яка допускається виходячи з критеріїв міцності корпусу. З огляду на вплив силових факторів, що змінюються внаслідок подовження, ця задача є досить складною.

У роботі проводиться дослідження щодо визначення максимальної допустимої довжини судна при його подовженні з урахуванням впливу силових факторів, які також залежать від збільшення довжини.

Висновки. Отримано алгоритм визначення граничної довжини судна, що забезпечується фактичним моментом опору корпусу судна або збільшеним моментом опору за рахунок допустимого підсилення конструкції в районі мідель-шпангоуту; визначено закономірності зміни відносних згинних моментів і відносних перерізуючих сил при прогині і перегині корпусу.

Ключові слова: пасажирське судно, розмірна модернізація, забезпечення міцності корпусу, безпека судноплавства.

ASSESSMENT OF THE DIMENSIONAL MODERNIZATION OF PASSENGER SHIPS BY THE CRITERION OF THEIR HULL STRENGTH

O.M. Shumylo

PhD in Engineering, Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

Summary

Introduction. The world cruise market shows a confident growth. This encourages shipping companies to develop and implement strategies to increase the passenger capacity of the fleet, one of which is the modernization of existing ships.

Modernization, which focuses on increasing the size – dimensional modernization, should be consistent with various models of ensuring the efficiency of ship operation: ship and shipping safety, functionality and economic efficiency.

One of the main factors affecting the safety of the ship and shipping is ensuring the strength of the hull, to which the Classification Societies pay great attention. The leading classification societies of the world, which are members of the International Association of Classification Societies, have developed universal conditions for ensuring the longitudinal strength of the hull, to which the Register of Shipping of Ukraine has joined. One of the key factors that ensures these conditions is the length of the vessel.

Determining the optimal length of the vessel and the size of the cylindrical insert is a big problem, the solution of which is the creation of a thorough mathematical model of the modernization of the vessel, which includes sub-models of the vessel's safety, its functionality and economic efficiency. This mathematical model has a target function expressed by indicators of economic efficiency, all other sub-models provide limitations to this function.

One of these limitations is the maximum length that is allowed based on the criteria of the strength of the case. Taking into account the influence of force factors that change as a result of elongation, this task is quite difficult.

In the work, a study is conducted on determining the maximum permissible length of the vessel during its lengthening, taking into account the influence of force factors, which also depend on the increase in length.

Conclusions. An algorithm was obtained for determining the maximum length of the ship, which is provided by the actual moment of resistance of the ship's hull or the increased moment of resistance due to the permissible strengthening of the structure in the area of the middle frame; the regularities of changes in relative bending moments and relative shearing forces during deflection and buckling of the hull are determined.

Key words: passenger ship, dimensional modernization, ensuring hull strength, navigation safety.

Постановка проблеми і огляд літератури. Рухаючись у морі, судна піддаються різноманітним навантаженням, які проєктувальники схематизують за різними силовими факторами і схемами їх прикладення, деформаціями і напруженнями, видами пружно-деформованого стану. Фахівцям із міцності корпусів під

час проведення їх конверсії необхідно якомога точніше визначити особливості навантажень конструкції і напрямок робочого навантаження, частоту виникнення, модель розподілу на таких конструкціях та закономірності їх зміни в результаті подовження судна.

Для суднових конструкцій характерно, що навантаження, які виникають в них, передаються поступово й перманентно від локальних елементів до сусідніх більших за розміром опорних елементів. Інженерна практика проектування корпусів накопичила великий досвід, який дозволяє систематизувати навантаження, що виникають з боку морського середовища: поздовжні, поперечні, місцеві навантаження. У відповідності до цієї систематизації проводять розрахунки на поздовжню, поперечну, місцеву міцність. Дані розрахунки стандартизовані провідними класифікаційними товариствами [1-12].

Морське середовище створює відповідну дію на корпус судна, яка проявляється у впливі статичного тиску морської води і динамічного тиску від удару хвиль і хитавиці.

Мета дослідження. Метою дослідження є визначення впливу міцності корпусу судна на межі проведення його розмірної модернізації. Мета досягається при розгляді і вирішенні таких задач:

- 1) проведення аналізу впливу збільшення довжини корпусу на розрахункові навантаження, що діють на корпус пасажирського судна з боку морського середовища;
- 2) дослідження закономірностей дії подовження судна на ключові силові фактори, що впливають на міцність його корпусу;
- 3) визначення граничного розміру циліндричної вставки за критерієм загальної поздовжньої міцності судна.

Виклад основного матеріалу. Регістр судноплавства [1–10] встановлює правила, методики щодо визначення розрахункового навантаження, спричиненого дією моря, якими унормовуються розрахункові формули, рівняння, залежності, значення параметрів, що застосовуються при проектуванні нових суден, модернізації, ремонті, надзорі й технічному нагляді існуючих. До таких параметрів належить хвильовий коефіцієнт c_w – основний фактор розрахункових навантажень на корпус, спричинених дією моря, який розраховується за рівнянням [1. с. 35]

$$\begin{aligned}c_w &= 0,0856L \text{ при } L \leq 90\text{ м,} \\c_w &= 10,75 - \left[(300 - L) / 100 \right]^{\frac{3}{2}} \text{ при } 90\text{ м} < L < 300\text{ м,} \\c_w &= 10,75 \text{ при } 300\text{ м} \leq L \leq 350\text{ м,}\end{aligned} \quad (1)$$

де L – довжина судна, м;

Проаналізуємо вплив збільшення довжини судна на діапазон значень, який може приймати коефіцієнт c_w , на прикладі круїзних лайнерів:

- *Birka Paradise* (ІМО номер 9273727, $L=177$ м, $B=28,0$ м, $T=6,6$ м, $GT=34728$ gt);
- *Fram* (ІМО номер 9370018, $L=113,7$ м, $B=20,2$ м, $T=5,1$ м, $GT=34728$ gt);
- *Seaborun Odissey* (ІМО номер 9417086, $L=168,1$ м, $B=26,0$ м, $T=6,4$ м, $GT=34728$ gt);

- *Color Fantasy* (ІМО номер 9278234, L=223,7 м, В=35,0 м, Т=7,0 м, GT=75000 gt);
- *MSC Opera* (ІМО номер 9250464, L=251,25 м, В=28,8 м, Т=6,6 м, GT=59000 gt);
- *Pride of America* (ІМО номер 9250464, L=287,49 м, В=32,2 м, Т=8,0 м, GT=80439 gt);
- *AIDA* (ІМО номер 9250464, L=193,3 м, В=27,6 м, Т=6,2 м, GT=38531 gt);
- *Проекту 1881-010-1* (L=205 м, В=28,6 м, Т=9,46 м, GT=39939 gt).

На рис. 1 і рис. 2 показані граничні значення, що може приймати коефіцієнт c_w для розглянутих суден, аргументом для яких є відносно подовження їхніх корпусів. Результати розрахунків на цих графіках свідчать, що найбільше відхилення c_w досягається при найменшій початковій довжині L_0 .

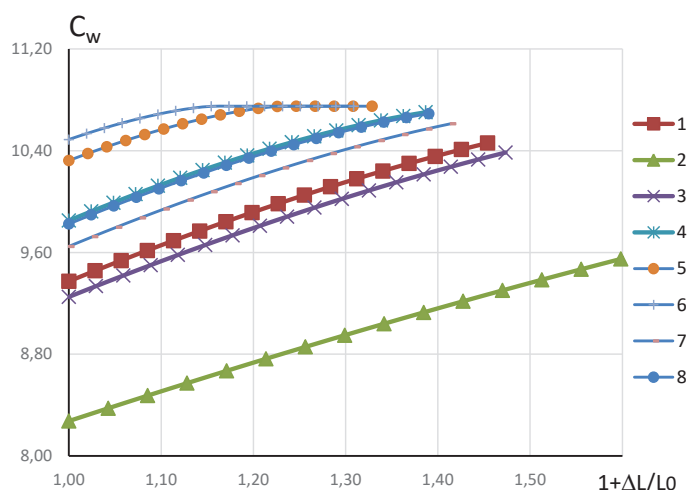


Рис. 1. Результати розрахунку хвильового коефіцієнту c_w залежно від подовження (у відносних одиницях) на прикладі таких суден: 1 – *Birka Paradise*; 2 – *Fram*; 3 – *Seaborne Odissey*; 4 – *Colore Fantasy*; 5 – *MSC Opera*; 6 – *Pride of America*; 7 – *AIDA*; 8 – *проект 1881*

Так, для лайнерів: «*Fram*» ($L_0=113,7$ м), «*Seaborne Odissey*» ($L_0=198,1$ м), «*Birka Paradise*» ($L_0=177,1$ м) таке відхилення склало 10,5 % при збільшенні довжини на 40 %, «*AIDA*» ($L_0=177,1$ м) – 9,2 % при збільшенні довжини на 40 %, «*Colore Fantasy*» ($L_0=177,1$ м) і проекту 1881 ($L_0=177,1$ м) – 8,6 % при збільшенні довжини на 40 %, «*MSC Opera*» ($L_0=243$ м) – на 4 %; «*Pride of America*» ($L_0=259$ м) – на 2,6 %. Крім того, як впливає з рівняння (1), при довжинах понад 300 м хвильовий коефіцієнт перестав зростати.

Наступне питання, яке слід проаналізувати, – це вплив зміни довжини судна на розрахунковий тиск, який сприймається корпусом судна від різноманітної дії на нього моря. Цей тиск розраховується за виразом [1, с. 36]

$$p = p_{st} + p_w, \quad (2)$$

де p_{st} – статичний тиск, кПа;

$$p_{st} = 10z \quad (3)$$

z – відстань від точки, в якій діє тиск, до вантажної (літня марка) ватерлінії, м;

p_w – розрахунковий хвильовий тиск, спричинений рухом судна по профілю хвилі [1, с. 36]

$$p_w = p_{w0} - 1,5c_w(z/d), \quad (4)$$

де p_{w0} – розрахунковий хвильовий тиск на борт корпусу в області конструктивної ватерлінії [1, с. 36],

$$p_{w0} = 5c_w a_v a_x, \quad (5)$$

a_v – вертикальна проекція прискорення точки корпусу при ударі хвилі, m/c^2 , [1, с. 36]

$$a_v = \left[0,8v_0(L/10^3 + 0,4)/\sqrt{L} \right] + 1,5, \quad (6)$$

v_0 – специфікаційна швидкість;

a_x – горизонтальна проекція прискорення точки корпусу при ударі хвилі [1, с. 36], m/c^2 ;

$$a_x = k_x(1 - 2x_1/L) \geq 0,267, \quad (7)$$

k_x – коефіцієнт поперечних перерізів до носа та до корми від міделя відповідно;

x_1 – відстань поперечного перерізу, який розглядається, від найближчого (носового або кормового) перпендикуляра, м.

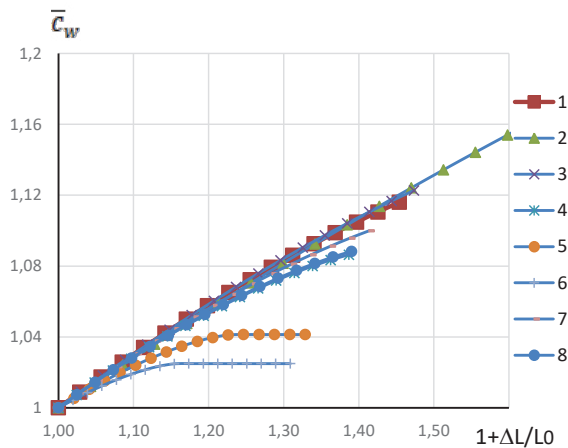


Рис. 2. Залежність відносного коефіцієнта \bar{c}_w від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

Виходячи з регламентованих Регістром [1] формул (3)-(7), отримаємо рівняння для визначення тиску p_w у загальному вигляді, яке відображає залежність p_w від довжини судна і дозволяє оцінити кількісно і якісно діапазон зміни тисків залежно від встановленої зміни довжин судна

$$p_w = 5c_w \left(\left[0,8v_0 \left(L / 10^3 + 0,4 \right) / \sqrt{L} \right] + 1,5 \right) \left(k_x \left(1 - 2x_1 / L \right) \right) - 1,5c_w \left(z / d \right) \quad (8)$$

Результати досліджень впливу подовження суден на хвильовий тиск p_w , що визначається за формулою (8), показані на рис. 3 і рис. 4. Для суден з найменшою початковою довжиною L_0 спостерігається найменший тиск p_w , який зростає при максимальному збільшенні довжини в середньому на 23 кПа ... 25 кПа. З графіка рис. 4 випливає, що для семи з розглянутих суден відносний тиск $\bar{p}_w = p_w / p_{w0}$ змінюється таким чином: збільшення відносної довжини судна $L / L_0 = 1 + \Delta L / L_0$ на 10 %, 20 %, 30 % призводить до зростання \bar{p}_w на 10 %, 20 %, 30 %, тобто в діапазоні значень, для яких фактично проводять подовження суден на практиці. Разом із тим для суден з початковою довжиною меншою до 120 м...140 м (лайнер «Fram») така послідовність \bar{p}_w має занижені значення 9%, 18%, 27%.

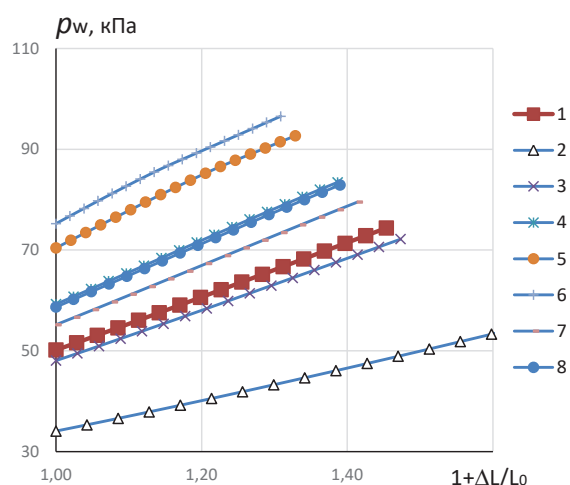


Рис. 3. Залежність розрахункового хвильового тиску, спричиненого рухом судна по профілю хвилі, від відносного подовження на прикладі таких суден:
1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy;
5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

На рис. 5. представлено результати визначення розрахункового тиску P , що визначався за формулою (2), які ілюструють зростання від початкової величини в середньому на 20 кПа ... 21 кПа.

Ключовим силовими факторами, що головною мірою впливають на загальну поздовжню міцність корпусу судна, є хвильові згинальні моменти і перерізуючі сили у поперечному перерізі. Правила, за якими визначаються ці фактори, були

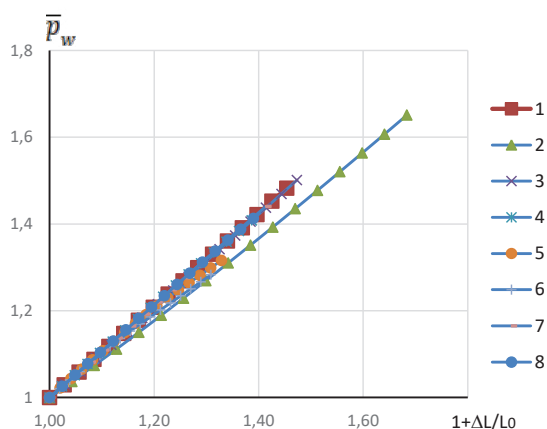


Рис. 4. Залежність відносного розрахункового хвильового тиску, спричиненого рухом судна по профілю хвилі, від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

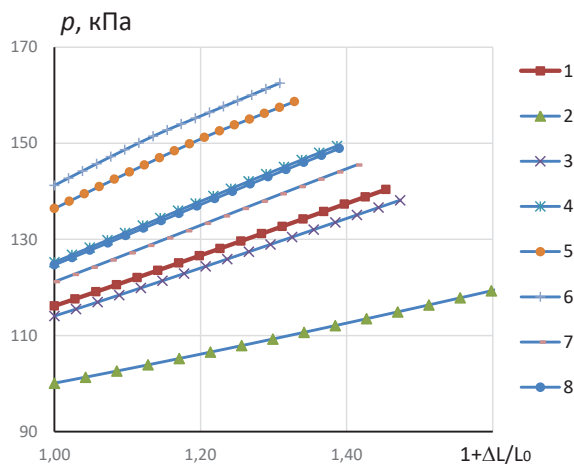


Рис. 5. Результати розрахунку повного тиску на корпус суден з боку моря від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

стандартизовані Міжнародною асоціацією класифікаційних товариств (МАКТ) (International Association of Classification Societies (IACS)) в уніфікованих вимогах, прийнятих в 1989 році [2–10]. Загальну міцність судна визначають поздовжні силові навантаження, які проявляються через згинальні моменти, перерізуючі сили і крутні моменти, вплив крутних моментів є несуттєвим порівняно

з першими двома факторами. Навантаження, що визначають загальну поздовжню міцність корпусу, поділяються на дві категорії – статичні і динамічні.

Виникнення статичних згинальних моментів і перерізуючих сил спричинено місцевими (локальними) нерівностями між силами ваги та плавучості в умовах тихої морської води. Розрахунковий згинальний момент на тихій воді унормовується правилами МАКТ і розраховується за формою [1–10], яку запишемо для початкової довжини судна

$$M_{sw0} = \pm 76 c_w B L_0^2 (C_{b0} + 0,7) 10^{-3}, \quad (9)$$

де C_{w0} – хвильовий коефіцієнт, що розраховується за залежністю (1);

B – ширина судна, м;

L_0 – довжина судна до подовження, м;

C_{b0} – коефіцієнт поздовжньої повноти.

Формула (9) при подовженні корпусу на величину $L = L_0 + \Delta L$ має вигляд

$$M_{sw} = \pm 76 c_w B L^2 (C_b + 0,7) 10^{-3} = \pm 76 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7) 10^{-3}, \quad (10)$$

Відносне збільшення розрахункового згинального моменту на тихій воді визначається згідно з (9) і (10) виразом

$$\frac{M_{sw}}{M_{sw0}} = \frac{c_w L^2 (C_b + 0,7)}{c_w L_0^2 (C_{b0} + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7)}{c_w L_0^2 (C_{b0} + 0,7)} \quad (11)$$

Характер впливу подовження ΔL судна на збільшення розрахункового згинального моменту представлено на рис. 6 у відносних одиницях зростання. Заслуговує на увагу той факт, що на ділянці подовження $1 \leq 1 + \Delta L / L_0 \leq 1,2$ спостерігається досить тісний збіг результатів розрахунків для широкого кола суден з різними довжинами, водотоннажністю і осадками, в середньому згинальний момент збільшиться в 1,61 рази, розсіювання якого склало 0,04 одиниці.

Хвилювання моря призводить до появи динамічних поздовжніх навантажень – судно поступово переміщується на вершину хвилі, що викликає перегин корпусу і відповідні хвильові згинальні моменти і перерізуючі сили, які належним чином створюють деформації перегину і зсуву; потім воно переходить на підшову хвилі, що спричиняє прогин корпусу з відповідними згинальними моментами і перерізуючими силами і деформаціями. Такі навантаження і деформації діють циклічно під час руху судна від однієї хвилі до наступної, передаючи їх на балки конструкції і обшивку, що підпорядковується процесам забезпечення втомної міцності корпусу.

Як зазначалося раніше, провідними кваліфікаційними товариствами (МАКТ- IACS) приймаються однакові правила, за якими здійснюється визначення динамічного поздовжнього навантаження (згинних моментів і переізуючих сил). Згідно із цими правилами хвильовий згинальний момент M_w , який виникає у поперечному перерізі корпусу пасажирського судна і прикладається у вертикальній його площині, визначається за рівняннями [1–10], кН·м, що призводить до перегину корпусу судна з початковою довжиною

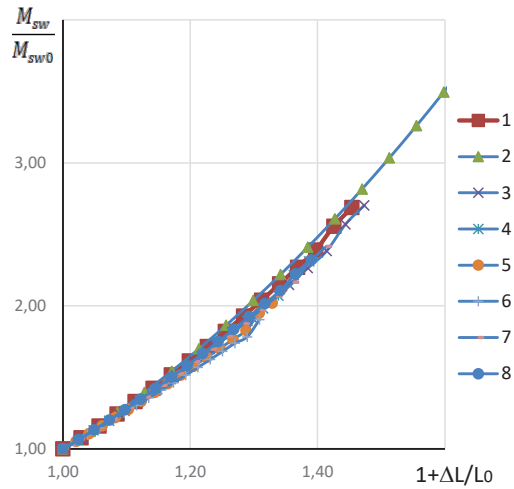


Рис. 6. Збільшення розрахункового згинального моменту корпусу судна на тихій воді залежно від його подовження, на прикладі таких суден:
1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy;
5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

$$M_{w0} = 190 c_{w0} B L_0^2 C_{b0} \alpha 10^{-3}, \quad (12)$$

і до його прогину

$$M_w = -110 c_w B L_0^2 (C_b + 0,7) \alpha 10^{-3}, \quad (13)$$

де c_{w0} – хвильовий коефіцієнт;

B – ширина судна, м;

L_0 – довжина судна, м;

C_{b0} – коефіцієнт загальної повноти;

α – коефіцієнт.

У разі подовження корпусу рівняння (12) і (13) будуть мати такий вигляд

$$M_w = 190 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 C_{b0} \alpha 10^{-3}, \quad (14)$$

$$M_w = -110 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7) \alpha 10^{-3} \quad (15)$$

З метою аналізу впливу подовження судна на характер зміни хвильового згинального моменту застосуємо рівняння (12) і (14), розділимо їх – у результаті отримаємо вираз для визначення відносного згинального моменту при перегині корпусу

$$\frac{M_w}{M_{w0}} = \frac{c_w L^2 C_b}{c_{w0} L_0^2 C_{b0}} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 C_b}{c_{w0} L_0^2 C_{b0}}, \quad (16)$$

і аналогічно, застосовуючи формули (13) і (15), – вирази при прогині корпусу

$$\frac{M_w}{M_{w0}} = \frac{c_w L^2 (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0^2 (C_b + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0^2 (C_b + 0,7)} \quad (17)$$

Результати розрахунків відносних моментів у варіантах перегину і прогину подані на рис. 7 і рис. 8 відповідно.

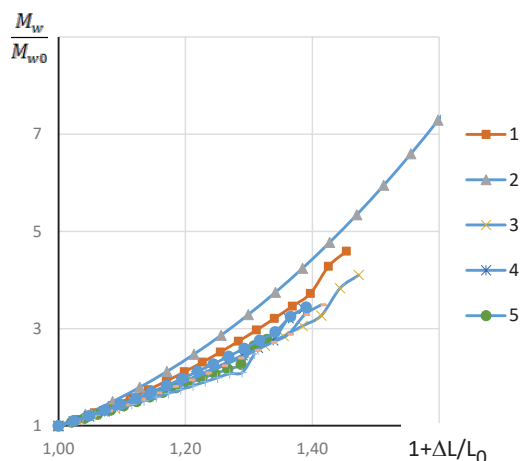


Рис. 7. Відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з перегиня корпусу залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

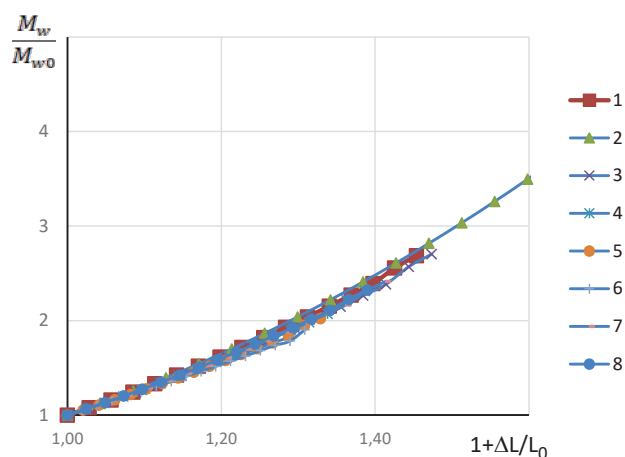


Рис. 8. Відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з прогином корпусу залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

Детальний розгляд графіків рис. 7 і рис. 8 дозволяє зробити такі висновки: відносний розрахунковий згинальний момент вказаних суден при перегині корпусу при відносному подовженні $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,1$ змінюється в інтервалі 1,3...1,6, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,2$ – в 1,8...2,3, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,3$ – в 2,3 ...3,2, тобто зі збільшенням довжини судна розкид значень M_w / M_{w0} зростає. Разом з тим при прогині судна (рис.8) спостерігаються наступні результати – при відносному подовженні $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,1$ відношення M_w / M_{w0} змінюється в інтервалі 1,35...1,55, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,2$ – в 1,55...1,65, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,3$ – в 1,75 ...2,0. Таким чином, при прогині судна відносне збільшення згинального моменту знаходиться у вузькому інтервалі значень для розглянутих суден із різними геометричними характеристиками (довжина, ширина, осадка, коефіцієнт повноти), експлуатаційними характеристиками (гросстонаж, пасажиромісткість).

Уніфіковані вимоги МАКТ до розрахунку хвильової перерізуючої сили у поперечному перерізі [1–10] представлені залежностями такого виду при початковій довжині судна:

при його перегині

$$N_{w0} = 30 c_{w0} B L_0 (C_{b0} + 0,7) f_1 10^{-2}, \quad (18)$$

і прогині

$$N_w = -30 c_{w0} B L_0 (C_{b0} + 0,7) f_2 10^{-2} \quad (19)$$

де f_1, f_2 – коефіцієнт

Рівняння (3.18) і (3.19) при розрахунку перерізуючої сили з подовженням довжини $L = L_0 + \Delta L$ корпусу будуть записані таким чином:

$$N_w = 30 c_w B L (C_b + 0,7) f_1 10^{-2} \quad (20)$$

$$\frac{N_w}{N_{w0}} = \frac{c_w L (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0 (C_{b0} + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L) (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0 (C_{b0} + 0,7)} \quad (21)$$

Користуючись отриманою залежністю (21), визначимо відносну перерізуючу силу N_w / N_{w0} залежно від подовження судна. Результати розрахунків цієї сили показані на рис. 9. Для переліку суден, що представлені в широкому діапазоні довжин і водотонажностей, слід зазначити, що при подовженні їх на 10 % перерізуюча сила зросла на 18 % ... 20 %, тобто спостерігається щільне зростання цієї сили без істотного впливу геометричних характеристик. При подальшому збільшенні довжини на 20 % (цей діапазон часто застосовується при подовженнях) перерізуюча сила зростає в межах 24 % ... 29 %. Також варто зазначити: чим менша початкова довжина судна, тим більше відносне зростання перерізуючої сили (рис. 9): позиція 1, найвищий графік, – лайнер «Fram» ($L_0=113,7$ м) і позиція 6, найнижчий графік, – *Pride of America* ($L_0=287,49$ м).

Міцність корпусу судна, в тому числі і у разі проведення розмірної модернізації, забезпечується такими її складниками, що утворюють цілісну систему щодо забезпечення безпеки судноплавства: подовжня, поперечна і місцева міцність.

Ключовим аспектом у визначенні найбільшої довжини судна у разі проведення розмірної модернізації є забезпечення вимог поздовжньої міцності.

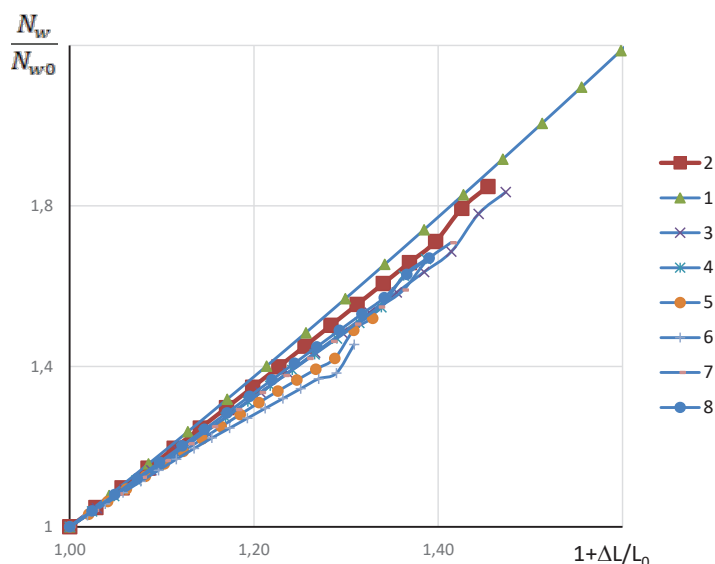


Рис. 9. Відносна розрахункова переріуюча сила корпусу судна при хвилюванні залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проект 1881

Регістр судноплавства регламентує умову забезпечення норм поздовжньої міцності корпусу судна [1-10, 14, 17]

$$W^{fact} \geq W, \quad (22)$$

$$W^{fact} \geq W^*, \quad (23)$$

де W^{fact} – фактичний момент опору корпусу судна (для палуби і днища відповідно), що визначається за аналізом еквівалентного бруса при його перетині по мідель-шпангоуту, см^3 ;

W , W^* – необхідні моменти опору корпусу за критеріями міцності при перегині (hogging) і прогині (sagging), см^3 .

Ці моменти опору в середній частині корпусу повинні бути не менші за [1-10] при перегині

$$W = \frac{M_{Theg}}{\sigma_{don}} = \frac{M_{sw} + M_w}{\sigma_{don}} 10^3, \quad (24)$$

і прогині

$$W^* = \frac{M_{Tsag}}{\sigma_{don}} = \frac{|M_{sw} + M_w^* + M_F|}{\sigma_{don}} 10^3, \quad (25)$$

де M_{Thog} , M_{Tsag} – розрахунковий згинальний момент перегині і згині корпусу, кНм;

M_F – згинальний момент при ударі хвиль об розвал бортів, який спричиняє прогин судна, для пасажирських суден має незначну дію, тому надалі не враховується.

$\sigma_{дон}$ – допустимі напруження, $\sigma_{дон} = 175 / \eta$,

η – коефіцієнт використання механічних властивостей.

Правилами Регістру передбачаються, крім виконання норм (22) і (23), такі вимоги до забезпечення подовжньої міцності перетину корпусу:

– фактичний момент опору повинен бути не меншим за мінімальний [1-10]:

$$W^{fact} \geq W_{min} = c_w B L^2 (c_b + 0,7) \eta \quad (26)$$

– фактичний момент інерції повинен бути не меншим за мінімальний [1-10]:

$$I^{fact} \geq I_{min} = 3c_w B L^3 (c_b + 0,7) \quad (27)$$

Таким чином, для забезпечення міцності корпусу при проведенні модернізації судна необхідно забезпечити виконання обов'язкових умов (22), (23), (26) і (27).

Міцність корпусу є важливою властивістю безпеки мореплавання і живучості судна. Збільшення довжини судна потребує визначення максимально допустимої довжини циліндричної вставки ΔL саме за критерієм поздовжньої міцності (рис. 10) у разі, коли конструкція вставки відповідає конструкції основного корпусу, тобто коли її додатково не підсилюватимуть.

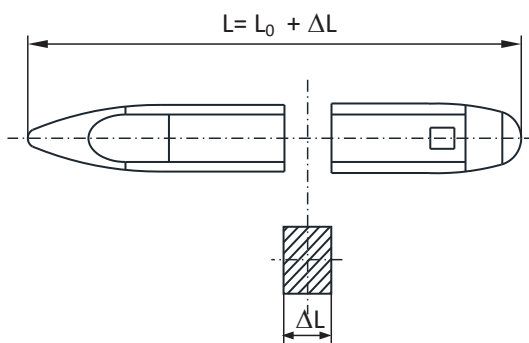


Рис. 10. Додавання до корпусу пасажирського судна циліндричної вставки

Процедуру оцінки величини ΔL (рис. 10) пропонується здійснити виходячи з постулатів наук про міцність матеріалів і конструкцій, які передбачають, що після проектних розрахунків обов'язково проводяться перевірні розрахунки на

забезпечення відповідного рівня міцності. Таким чином, за додатковими умовами Регістру (26) і (27) будемо проводити проектні розрахунки щодо оцінки довжини вставки, а завершальні перевіріні розрахунки – за (22) і (24), (23) і (25).

З формули (26) визначимо допустиму довжину судна, приймаючи, що мінімальний момент опору дорівнює фактичному, визначеному за кресленням мідельшпангоуту, $W_{min} = W^{fact}$

$$L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_w B(c_b + 0,7)\eta}} \quad (28)$$

Хвильовий коефіцієнт виразимо через його початкове значення c_{w0} і коефіцієнт відносного зростання \bar{c}_w , що можна орієнтовно визначити за рис. 2 – $c_w = c_{w0}\bar{c}_w$, внаслідок чого рівняння (28) приводиться до вигляду

$$L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)\eta}} \quad (29)$$

У свою чергу умова, що представлена, у вигляді рівняння (27) відкриває можливість підрахувати попередньо граничну довжину вставки за відповідним критерієм

$$L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_w B(c_b + 0,7)}} \quad (30)$$

Аналогічні міркування застосовується для рівняння (30), що дозволяє записати його у вигляді

$$L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)}} \quad (31)$$

Для того щоб визначити граничний розмір циліндричної вставки відповідно до рис. 10, рівняння (29) і (31) перетворюються таким чином

$$\Delta L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)\eta}} - L_0 \quad (32)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)}} - L_0 \quad (33)$$

Для отриманих граничних довжин за критеріями (29) і (31) визначається мінімальне значення

$$L = \min[L_1; L_2] \quad (34)$$

і відповідно ΔL

$$\Delta L = \min[\Delta L_1; \Delta L_2] \quad (35)$$

Після того як попередньо розраховано довжину L , здійснюється перевірний розрахунок за критеріями поздовжньої міцності корпусу (22) і (24), (23) і (25). Якщо умова виконується, то необхідно уточнити значення \bar{c}_w і \bar{c}_b і повторити розрахунок до виконання умови $(W^{fact} - W_i) \geq \delta$ і $(W^{fact} - W_i^*) \geq \delta$, де δ – необхідна точність, що узгоджується з Регістром. Алгоритм розрахунку граничної довжини показано на рис. 11.

Представлена задача вирішена для випадку, коли в площині мідель-шпангоуту не передбачається додаткових підкріплень еквівалентного бруса. За умови підсилення еквівалентного бруса (насамперед стрингерів і ширстрека та іншими конструктивними заходами) фактичний момент опору може бути збільшено на величину ΔW^{fact} , у такому випадку рівняння (32) і (33) будуть записані в такому вигляді

$$\Delta L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact} + \Delta W^{fact}}{c_{w0} \bar{c}_w B(c_{b0} \bar{c}_b + 0,7) \eta}} - L_0, \quad (36)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact} + \Delta I^{fact}}{3c_{w0} \bar{c}_w B(c_{b0} \bar{c}_b + 0,7)}} - L_0, \quad (37)$$

а умова забезпечення поздовжньої міцності буде представлена для перегину і згину

$$(W^{fact} + \Delta W^{fact}) \geq W, \quad (38)$$

$$(W^{fact} + \Delta W^{fact}) \geq W^*. \quad (39)$$

Для остаточного визначення граничної довжини у такому випадку застосовується алгоритм, що представлений на рис. 11. Згідно із цим алгоритмом процедура розрахунку граничної довжини судна проводиться таким чином:

- вихідні дані до розрахунку (блок 2): фактичний момент опору і момент інерції корпусу, коефіцієнт використання механічних властивостей, залежність хвильного коефіцієнта і коефіцієнта повноти корпусу від довжини судна,
- блок 3 прирівнює початкові значення хвильного коефіцієнта і коефіцієнта повноти корпусу, які визначені для довжини до модернізації, поточним значенням циклу;

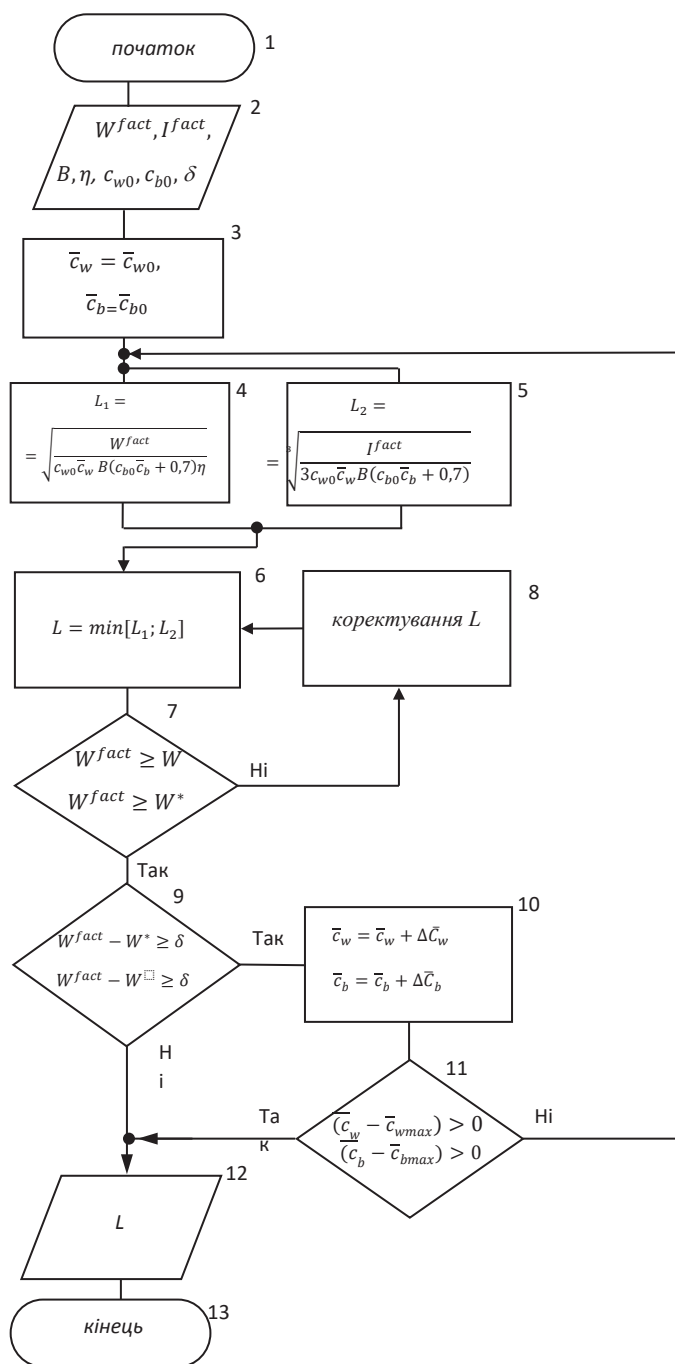


Рис. 11. Алгоритм розрахунку граничної довжини судна при його подовженні за критерієм поздовжньої міцності корпусу

– блоки 4 і 5 проводять розрахунки граничних значень довжини судна L_1 і L_2 згідно із забезпеченням обов’язкової умови за правилами Регістру щодо мінімального моменту інерції (26) і (27);

- блок 6 проводить визначення мінімальної довжини L_{min} ;
- блок 7 забезпечує перевірку виконання норм поздовжньої міцності корпусу при прогині і перегині корпусу за виразами (22) і (23);
- блок 8 виконує коригування довжини корпусу таким чином, щоб була виконана умова блоку 7;
- блок 9 перевіряє умову повноти використання фактичного моменту опору корпусу в порівнянні з необхідним моментом опору згідно з вимогою реєстру судноплавства;
- блок 10 здійснює перерахунок відносного хвильового коефіцієнта згідно із залежністю рис. 2.
- блок 11 виконує перевірку досягнення відносного хвильового коефіцієнта потоку; якщо вона не виконується, то повторюються процедури блоків 4-11.
- блок 12 виводить результати граничного подовження корпусу судна.

Висновки. Проаналізовано характер впливу збільшення довжини судна на розрахункові навантаження, що діють на корпус пасажирського судна з боку морського середовища. Найбільший вплив на зростання хвильового коефіцієнта має довжина судна, темпи його зростання найменші при досягненні довжини подовження в інтервалі 250 мм...300м; відносний хвильовий тиск зростає максимально наближено до прямо пропорційної залежності від відносної довжини.

Досліджено закономірності дії подовження судна на ключові силові фактори, що впливають на міцність його корпусу:

- значення відносного розрахункового згинального моменту на тихій воді характеризуються високою щільністю результатів (високим коефіцієнтом кореляції), тут спостерігається усереднене збільшення такого моменту на 50 % при зростанні відносної довжини на 20 %, на 100 % – при збільшенні цієї довжини в 30 %;
- відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з перегином корпусу залежно від його подовження має більше розсіювання результатів (зменшення коефіцієнта кореляції) при зростанні довжини на 20 % збільшується на 40 %...65 %, при зростанні довжини на 30 % – на 50 % ...100 %;
- відносна розрахункова перерізуюча сила збільшується таким чином: при зростанні довжини судна на 10 %, 20 %, 30 % – на 22%.. 27%, 28%.. 38%, 39%...59% відповідно.

Розроблено метод щодо визначення граничного розміру циліндричної вставки, до якої можливо проводити подовження, за критерієм загальної поздовжньої міцності судна, який ґрунтується на умовах міцності, які виражаються в забезпеченні фактичних моментів опору корпусу більших ніж необхідних при перегині і прогині, його мінімальних моментів опору і моментів інерції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр судноплавства України (2020). Том 2. Київ.
2. Det Norske Veritas AS (DNV) (2023). Rules for classification of ships. Hull structural design – Ships with length 100 metres and above. Det Norske Veritas AS (DNV). Part 3 chapter 1. URL: <http://www.dnvgl.com> (дата звернення 01.12.2023)

3. Germanisher Lloyd (1993). Classification and construction rules. Marine engineering. Part 1. Sea vessels. Hull. Hamburg.
4. American Bureau of Shipping (2014). Rules for building and classing. Steel vessels. Part 3. Hull construction and equipment. Houston.
5. Italian Naval Register (RINA) (2019). Rules for the Classification of Ships. Part B. Hull and Stability. Genova .
6. Nippon Kaiji Kyokai (2023): Rules For Survey and Construction Of Steel Ships. Part C.
7. Korean Register (2022). Rules for the Classification of Steel Ships. Part 3. Hull Structures. BUSAN.
8. China classification society (2020). Rules for the Classification of Ships. Part 3.
9. Bureau veritas (2019). Rules for the Classification of Steel Ships. PART B – Hull and Stability.
10. Lloyd's Register (2020). Rules and Regulations for the Classification of Ships.
11. Yasuhisa Okumoto, Yu Takeda, Masaki Mano, Tetsuo Okada. (2009). Design of ship hull structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
12. Richard G.B. and Keith J.B. (2011). Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition, New York: McGraw Hill.
13. Шумило О.М. (2022). Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації. *Розвиток транспорту*. 1 (12), 89-104.
14. Tanaka, Y.; Ogawa, H.; Tatsumi, A.; Fujikubo, M. (2015). Analysis Method of Ultimate Hull Girder Strength under Combined Loads. *Ships Offshore Struct.* 10, 587–598.
15. Shumylo, O. (2023). Дослідження впливу розмірної модернізації на геометричні характеристики пасажирського судна. *Розвиток транспорту*, (2(17), 75-89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>
16. Shumylo, O. (2022). Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*, 4(15), 58-77. Retrieved із <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
17. Andreas, I. (2010). Ultimate Longitudinal Strength of Corroded and Damaged Bulk Carriers. Doctorate Thesis, “Dunarea de Jos” University of Galati, Galati.
18. World Journal of Engineering and Technology Vol.03 No.04(2015), Article ID:61617,20 pages 10.4236/wjet.2015.34029.

REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea vessels. Register of Shipping of Ukraine (2020). Volume 2. Kyiv.
2. Det Norske Veritas AS (DNV) (2023). Rules for classification of ships. Hull structural design – Ships with length 100 meters and above. Det

- Norske Veritas AS (DNV). Part 3 chapter 1. URL: <http://www.dnvgl.com> (accessed 01.12.2023)
3. Germanischer Lloyd (1993). Classification and construction rules. Marine engineering. Part 1. Sea vessels. Hull. Hamburg.
 4. American Bureau of Shipping (2014). Rules for building and classification. Steel vessels. Part 3. Hull construction and equipment. Houston.
 5. Italian Naval Register (RINA) (2019). Rules for the Classification of Ships. Part B. Hull and Stability. Genoa.
 6. Nippon Kaiji Kyokai (2023): Rules For Survey and Construction Of Steel Ships. Part C.
 7. Korean Register (2022). Rules for the Classification of Steel Ships. Part 3. Hull Structures. BUSAN.
 8. China classification society (2020). Rules for the Classification of Ships. Part 3.
 9. Bureau veritas (2019). Rules for the Classification of Steel Ships. PART B – Hull and Stability.
 10. Lloyd's Register (2020). Rules and Regulations for the Classification of Ships.
 11. Yasuhisa Okumoto, Yu Takeda, Masaki Mano, Tetsuo Okada. (2009). Design of ship hull structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
 12. Richard GB. and Keith J.B. (2011). Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition, New York: McGraw Hill.
 13. Shumylo O.M. (2022). Determining the optimal length of passenger ships during their modernization. Transport development. 1 (12), 89-104.
 14. Tanaka, Y.; Ogawa, H.; Tatsumi, A.; Fujikubo, M. (2015). Analysis Method of Ultimate Hull Girder Strength under Combined Loads. Ships Offshore Struct. 10, 587–598.
 15. Shumylo, O. (2023). Study of the impact of dimensional modernization on the geometric characteristics of a passenger ship. Transport Development, (2(17), 75-89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>
 16. Shumylo, O. (2022). Optimization of dimensional modernization of passenger ships taking into account energy efficiency. Development of transport, (4(15), 58-77. Retrieved from <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
 17. Andreas, I. (2010). Ultimate Longitudinal Strength of Corroded and Damaged Bulk Carriers. Doctorate Thesis, “Dunarea de Jos” University of Galati, Galati.
 18. World Journal of Engineering and Technology Vol.03 No.04(2015), Article ID:61617,20 pages 10.4236/wjet.2015.34029.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.025.4

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.07>

МУЛЬТИМОДАЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ У НАЦІОНАЛЬНОМУ ЗАКОНОДАВСТВІ ТА МІЖНАРОДНОМУ КОНТЕКСТІ

О.В. Кириллова¹, В.Ю. Кириллова²

¹д.т.н., професор, завідувач кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-3414-7364

²к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0003-0738-0408

Анотація

Вступ. Мультимодальні перевезення є ключовим складником сучасної світової транспортної системи, а відповідний термін набуває все більшого значення в контексті глобалізації світової економіки та міжнародної торгівлі. Досвід європейських країн, зокрема Німеччини, Польщі та Нідерландів, демонструє, що ефективна організація мультимодальних перевезень є одним з ключових факторів успішної інтеграції в європейську транспортну систему. Україна, переймаючи цей досвід, може досягти подібних результатів шляхом інтенсифікації інвестицій у розвиток своєї транспортної інфраструктури, мультимодальних транспортних вузлів і портів, а також шляхом удосконалення відповідної нормативно-правової бази. **Мета.** Дослідити розвиток національного законодавства у сфері мультимодальних перевезень, виявити та проаналізувати термінологічні суперечності між національними та міжнародними нормами регулювання таких перевезень. **Результати.** У роботі розглянуто визначення поняття «мультимодальне перевезення» відповідно до Конвенції ООН про міжнародні мультимодальні перевезення вантажів (UN Convention on International Multimodal Transport of Goods), яку застосовують у сфері міжнародного права і статистики; проаналізовано Закон України «Про мультимодальні перевезення», ухвалений у 2021 р.; окреслено основні нововведення цього Закону та наголошено на його позитивних сторонах; звернено увагу на деякі недоліки та суперечності Закону України «Про мультимодальні перевезення», які викликають певні питання дискусійного характеру, а у майбутньому можуть призвести до певних суперечок у правовому та організаційному аспектах мультимодальних перевезень. **Висновки.** Прийняття Закону України «Про мультимодальні перевезення» знаменує суттєві зміни в нормативно-правовому регулюванні цієї сфери діяльності і є суттєвим кроком на шляху до інтеграції транспортної системи країни в європейську транспортну мережу та гармонізації правової бази у сфері транспортних технологій і систем

з міжнародними стандартами. Визначення поняття «мультимодальне перевезення» у Законі України «Про мультимодальні перевезення» відповідає багатьом міжнародним нормам, а також має свої особливості. Водночас відсутність у Законі України «Про мультимодальні перевезення» поняття «інтермодальне перевезення» вказує на прогалини в адаптації українського законодавства до сучасних світових та європейських практик. Визначення терміна «комбіновані перевезення» через поняття «мультимодальні перевезення» у Законі України «Про мультимодальні перевезення» і через поняття «інтермодальні перевезення» у джерелах міжнародного рівня демонструє підміну понять та зумовлює термінологічну колізію, яка у майбутньому матиме негативні наслідки в частині організації та практичної реалізації відповідних перевезень. Об'єднання в одному понятті «комбіновані перевезення» у Законі України «Про мультимодальні перевезення» відразу двох визначень, які використовуються у міжнародному контексті для позначення окремо «інтермодальних» і «комбінованих» перевезень, також доводить факт термінологічної неузгодженості національного законодавства з прийнятими в ЄС документами в частині мультимодальних, інтермодальних та комбінованих перевезень вантажів. З огляду на результати, отримані в дослідженні, та зроблені висновки, в роботі рекомендовано певні шляхи для подальшого розвитку мультимодальних перевезень в Україні

Ключові слова: Закон України «Про мультимодальні перевезення», мультимодальні перевезення, інтермодальні перевезення, комбіновані перевезення.

MULTIMODAL TRANSPORT IN NATIONAL LEGISLATION AND INTERNATIONAL CONTEXT

O. V. Kyrylova¹, V. Yu. Kyrylova²

¹Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head at the Department of Ports Operation and Cargo Handling Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID: 0000-0002-3414-7364

²Candidate of Engineering Sciences (Ph.D), Associate Professor at the Department of Fleet Operation and Shipping Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID: 0000-0003-0738-0408

Summary

Introduction. Multimodal transportation is a key component of the modern world transport system, and the corresponding term is gaining more and more importance in the context of the globalization of the world economy and international trade. The experience of European countries, in particular Germany, Poland and the Netherlands, shows that the effective organization of multimodal transportation is one of the key factors of successful integration into the European transport system. Ukraine, adopting this experience, can achieve similar results by intensifying investments in the development of its transport infrastructure, multimodal transport hubs and ports, as well as by improving the relevant regulatory and legal framework. **Purpose.** To investigate the development of national legislation in the field of multimodal transportation, to identify and analyze terminological contradictions between national and international norms

for the regulation of such transportation. **Results.** The work considers the definition of the concept of "multimodal transportation" in accordance with the UN Convention on International Multimodal Transport of Goods, which is used in the field of international law and statistics; analyzed the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation", which was adopted in 2021; the main innovations of this Law are outlined and its positive aspects are emphasized; attention is drawn to some shortcomings and contradictions of the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation", which cause certain issues of a debatable nature, and in the future may cause certain disputes in the legal and organizational aspects of multimodal transportation. **Conclusions.** The adoption of the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation" marks significant changes in the regulatory and legal regulation of this field of activity and is a significant step towards the integration of the country's transport system into the European transport network and the harmonization of the legal framework in the field of transport technologies and systems with international standards. The definition of the term "multimodal transportation" in the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation" corresponds to many international norms, and also has its own peculiarities. At the same time, the absence of the concept of "intermodal transportation" in the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation" indicates gaps in the adaptation of Ukrainian legislation to modern world and European practices. The definition of the term "combined transportation" through the concept of "multimodal transportation" in the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation" and through the concept of "intermodal transportation" in international sources demonstrates a change of concepts and causes a terminological collision, which in the future will have negative consequences for the organization and practical implementation of relevant transportation. The combination of two definitions in one concept of "combined transportation" in the Law of Ukraine "On Multimodal Transportation" that are used in the international context to designate separately "intermodal" and "combined" transportation also proves the fact of terminological inconsistency of national legislation with documents adopted in the EU in terms of multimodal, intermodal and combined cargo transportation. In view of the results obtained in the research and the conclusions drawn, the work recommends certain ways for the further development of multimodal transportation in Ukraine.

Key words: Law of Ukraine "On Multimodal Transportation", multimodal transportation, intermodal transportation, combined transportation.

Вступ. Мультимодальні перевезення є ключовим складником сучасної світової транспортної системи, а відповідний термін набуває все більшого значення в контексті глобалізації світової економіки та міжнародної торгівлі.

Досвід європейських країн, зокрема Німеччини, Польщі та Нідерландів, демонструє, що ефективна організація мультимодальних перевезень є одним з ключових факторів успішної інтеграції в європейську транспортну систему. Наприклад, у Німеччині розвиток мультимодальних хабів забезпечує високу ефективність транспортних операцій, знижує витрати на логістику та сприяє екологічно чистим перевезенням. Польща, будучи транзитною країною, активно інвестує у модернізацію своїх мультимодальних терміналів, що дозволяє їй ефективно використовувати своє географічне розташування між Сходом і Заходом Європи. Нідерланди

є одним із провідних центрів мультимодальних перевезень у світі. Досвід цієї країни є зразковим у багатьох аспектах. Ось кілька ключових моментів:

– інтеграція транспортних систем. У Нідерландах добре розвинена транспортна інфраструктура, яка ефективно інтегрує різні види транспорту: залізничний, автомобільний, річковий і морський. Роттердамський порт є найбільшим у Європі та слугує ключовим вузлом для мультимодальних перевезень. Завдяки його інтеграції із залізницею, внутрішніми водними шляхами та автомобільними дорогами, вантажі швидко переміщуються до інших частин Європи;

– цифровізація та автоматизація. Нідерланди активно використовують цифрові технології для оптимізації транспортних процесів. Це охоплює автоматизацію роботи терміналів, використання цифрових платформ для відстеження вантажів, а також розробку інтелектуальних транспортних систем, які допомагають мінімізувати затори та затримки;

– екологічна стійкість. Значна увага в Нідерландах приділяється зниженню вуглецевого сліду мультимодальних перевезень. Використання електрифікованих залізниць, водних шляхів, а також розвиток «зеленої» інфраструктури, зокрема енергозберігаючих портів, є важливими компонентами стратегії сталого розвитку мультимодальних перевезень у цій країні;

– участь у міжнародних ініціативах. Нідерланди активно співпрацюють з іншими країнами в рамках європейських і міжнародних програм для розвитку мультимодальних перевезень. Це включає в себе проекти TEN-T (Trans-European Transport Network) та інші міжнародні ініціативи, які спрямовані на поліпшення транспортної інфраструктури та з'єднання між країнами;

– освітні та наукові програми. Важливою частиною успіху Нідерландів на шляху розвитку мультимодальних перевезень є високий рівень підготовки фахівців у сфері транспортних систем і технологій. Нідерланди інвестують у розвиток освітніх програм, дослідницьких інститутів та технологічних інновацій, які сприяють розвитку мультимодальних перевезень. Завдяки цим зусиллям Нідерланди змогли створити ефективну, надійну та екологічно стійку систему мультимодальних перевезень, яка є взірцем для багатьох країн.

Україна, переймаючи цей досвід, може досягти подібних результатів шляхом інтенсифікації інвестицій у розвиток своєї транспортної інфраструктури, мультимодальних транспортних вузлів і портів, а також шляхом удосконалення відповідної нормативно-правової бази. Тим більше що Україна має значний потенціал для розвитку мультимодальних перевезень, що підтверджується наявною інфраструктурою та зростаючим попитом на такі послуги з боку бізнесу.

Постановка проблеми. З огляду на актуальність дослідження мультимодальних перевезень, а також сучасні виклики щодо їх організації та реалізації, проблема окреслюється низкою таких питань:

– невідповідність між національним законодавством та міжнародними стандартами у сфері мультимодальних перевезень, що ускладнює їх ефективну організацію та практичну реалізацію;

– правові колізії та відсутність єдиних правил, що регулюють відповідальність сторін у мультимодальних перевезеннях, які перешкоджають ефективному врегулюванню спорів;

- недостатня гармонізація національних правових норм із міжнародними конвенціями, що створює бар'єри для розвитку мультимодальних перевезень;
- складність адаптації національного законодавства до нових викликів та технологій у сфері мультимодальних перевезень у глобальному контексті;
- відсутність чітких механізмів контролю та відповідальності у національній правовій системі при реалізації мультимодальних перевезень;
- неефективність національних правових механізмів у забезпеченні захисту прав та інтересів учасників мультимодальних перевезень у міжнародному контексті.

Перелічене дозволяє акцентувати увагу на ключових викликах та перешкодах, з якими стикаються національні правові системи та вітчизняні транспортні компанії в контексті міжнародних мультимодальних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щодо самого поняття «мультимодальне перевезення» та його визначення. Як було встановлено в роботах [1; 2, п. 4.2], у міжнародному контексті згідно з документом UNCTAD/SDTE/TLB/2 «Implementation of multimodal transport rules» [3] «найавторитетнішою дефініцією поняття "мультимодальне перевезення"», яку застосовують у сфері міжнародного права і статистики, визнано дефініцію, сформульовану в Конвенції ООН про міжнародні мультимодальні перевезення вантажів (UN Convention on International Multimodal Transport of Goods) [4]. Відповідно до цього документа [4, с. 5] «"Міжнародне мультимодальне перевезення" означає перевезення вантажів щонайменше двома різними видами транспорту на підставі договору мультимодального перевезення з місця в одній країні, де вантажі поступають у ведення оператора мультимодального перевезення, до обумовленого місця доставки в іншій країні. Операції по вивезенню і доставці вантажів, що здійснюються на виконання договору перевезення тільки одним видом транспорту, як визначено в такому договорі, не вважаються міжнародним мультимодальним перевезенням»¹.

Важливість розвитку мультимодальних перевезень для економіки України зумовлена як її географічним розташуванням, що надає широкі можливості для інтеграції її транспортних мереж до європейської системи транспортних комунікацій, так і необхідністю оптимізації технологічних процесів і операцій у внутрішніх перевезеннях. У контексті інтеграційної політики України для створення умов надійного, ефективного та безпечного транспортного забезпечення логістичних ланцюгів різних виробничих і торгових підприємств, особливого значення набуває правове регулювання мультимодальних перевезень.

У зв'язку з цим у 2021 році в Україні було прийнято довгоочікуваний Закон «Про мультимодальні перевезення» [5], який містить ряд нововведень і уточнень. Цей Закон став важливим кроком у напрямі адаптації національного законодавства до міжнародної правової бази з цих питань. Проте позитивні сторони Закону України «Про мультимодальні перевезення» не позбавляють його деяких недоліків та суперечностей, залишаючи певні питання дискусійного характеру.

¹ «International multimodal transport» means the carriage of goods by at least two different modes of transport on the basis of a multimodal transport contract from a place in one country at which the goods are taken in charge by the multimodal transport operator to a place designated for delivery situated in a different country. The operations of pick-up and delivery of goods carried out in the performance of a unimodal transport contract, as defined in such contract, shall not be considered as international multimodal transport [4, с. 6].

Формулювання цілей статті. Мета статті – дослідити розвиток національного законодавства у сфері мультимодальних перевезень, виявити та проаналізувати термінологічні суперечності між національними та міжнародними нормами регулювання таких перевезень.

Основний матеріал дослідження. До прийняття Закону «Про мультимодальні перевезення» [5] одним із головних бар'єрів було недостатнє нормативне забезпечення, що ускладнювало процеси координації між різними видами транспорту та знижувало конкурентоспроможність українських транспортних операторів на міжнародному ринку. Крім того, до прийняття цього Закону в українському законодавстві не існувало єдиного та чіткого визначення поняття «мультимодальні перевезення». Визначення, що використовувалися раніше, трактували це поняття доволі спрощено, а саме:

- обмежували його лише залученням до перевезення кількох видів транспорту;
- не надавали особливого значення єдиному договору;
- не наголошували на ролі мультимодального перевізника.

Це часто призводило до невизначеності в регулюванні правовідносин між учасниками транспортного процесу, спричиняло юридичні непорозуміння та складнощі у вирішенні спорів.

Визначення, яке сформульовано в новому Законі України «Про мультимодальні перевезення» [5], усуває ці недоліки, чітко окреслює правові рамки та обов'язки учасників транспортного процесу, враховує сучасні вимоги та реалії ринку транспортних послуг. Згідно з цим Законом [5] «мультимодальне перевезення» визначається як «перевезення вантажів двома або більше видами транспорту на підставі договору мультимодального перевезення, що здійснюється за документом мультимодального перевезення». У Законі також підкреслюється важливість єдиного договірної підходу до організації перевезень та висвітлюється роль мультимодального перевізника як основного координатора всього процесу.

Крім того, у Законі України «Про мультимодальні перевезення» [5] введено таке поняття, як «внутрішнє мультимодальне перевезення», яке визначається як «мультимодальне перевезення без перетину державного кордону України». Водночас у світовій практиці поняття «мультимодальні перевезення» трактується, як правило, у прив'язці до міжнародного перевезення. Наприклад, у вищезгаданій Конвенції ООН про міжнародні мультимодальні перевезення вантажів (UN Convention on International Multimodal Transport of Goods) [4] 1980 року увага акцентується саме на міжнародному характері такого перевезення, а також визнається провідна роль договору та відповідальності оператора.

Серед інших нововведень Закону України «Про мультимодальні перевезення» [5] зазначимо таке:

а) запровадження єдиного транспортного документа. Закон передбачає введення уніфікованого документа, що значно спрощує процедуру оформлення та обліку перевезень, скорочує витрати часу на оформлення вантажів та зменшує бюрократичні перешкоди, що має важливе значення для суб'єктів господарювання;

б) регулювання відповідальності. Закон вводить чіткі правила щодо відповідальності оператора мультимодального перевезення за збереження вантажу на

кожному етапі його транспортування, що підвищує рівень захисту інтересів вантажовласників;

в) визначення поняття «мультимодальний термінал», яке означає «виробничо-перевантажувальний комплекс будь-якої форми власності, який використовується під час мультимодального перевезення для зміни видів транспорту, виконання операцій навантаження, розвантаження, зберігання вантажів тощо, а під час міжнародного перевезення також може бути пунктом пропуску (пунктом контролю) через державний кордон України»;

г) гармонізація з європейськими стандартами в частині окремих норм Закону, які в цілому відповідають основним положенням Європейського законодавства у сфері мультимодальних перевезень.

Таким чином, новий Закон України «Про мультимодальні перевезення» [5] є важливим кроком у напрямі модернізації транспортної системи країни та її інтеграції в єдиний транспортний простір Європи. Оновлене визначення терміна «мультимодальне перевезення», що підкреслює роль єдиного договору та мультимодального перевізника, є більш адаптованим до сучасних вимог ринку і враховує міжнародний досвід. Впровадження цього Закону створює передумови для підвищення ефективності транспортних операцій, зменшення ризиків і підвищення конкурентоспроможності українських перевізників на міжнародному рівні.

Проте позитивні сторони Закону України «Про мультимодальні перевезення» не позбавляють його деяких недоліків та суперечностей, залишаючи певні питання дискусійного характеру.

1. Одним із важливих недоліків, на який варто звернути увагу, є відсутність у Законі [5] поняття «інтермодальне перевезення». Хоча такі перевезення широко розповсюджені у світовій практиці, а відповідний термін чітко визначений у відомих документах [3; 6] міжнародного рівня, прийнятих ООН і детально розглянутих в роботах [1; 2, пп. 4.2, 4.3]. Усі визначення, які, наприклад, наведені в глосарії ООН «Terminology on combined transport» [6], як оголошено в цьому документі [6, с. 2]:

– встановлюють значення термінів для того, щоб зробити їх більш доступними для розуміння широкого кола людей, які ними нині користуються: політиків, технічного персоналу та операторів перевезень різними видами транспорту [6, с. 2];

– належать до географічних рамок Європи та можуть використовуватися в інших регіонах світу [6, с. 2];

– призначені для роботи таких міжурядових організацій, як Європейський союз (European Union, EU), Європейська конференція міністрів транспорту (European Conference of Ministers of Transport, ECMT) і Європейська економічна комісія ООН (United Nations Economic Commission for Europe, UN/ECE) [6, с. 2];

– мають на меті поступове узгодження відповідної термінології на національному та міжурядовому рівнях [6, с. 2].

На підставі сказаного вище, а також з огляду на орієнтацію України на Євроінтеграцію та створення сприятливого нормативно-правового середовища, узгодженого з європейським, дуже дивно виглядає «спроба» вітчизняних законотворців виключити із Закону України «Про мультимодальні перевезення» [5] поняття

«інтермодальне перевезення». Адже кожний термін та його визначення – це не просто набір слів та словосполучень, за кожним терміном стоїть певний зміст, певні правові, організаційні, технологічні, фінансові аспекти. Наприклад, поняття «інтермодальне перевезення» відображає такі перевезення, організація та практична реалізація яких значно сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів і операцій, зменшенню часу і витрат, пов'язаних із перевантаженням вантажів. Це впливає:

по-перше, із досвіду реалізації таких перевезень, які широко використовуються у світовій практиці;

по-друге, з особливостей інтермодальних перевезень, що відображено у змісті даного поняття, яке у різних документах ООН визначено по-різному, але має єдиний сенс:

– «Інтермодальне перевезення (intermodal transport): послідовне перевезення вантажів двома і більше видами транспорту в одній і тій же вантажній одиниці (loading unit) або автотранспортному засобі (road vehicle) без перевантаження самого вантажу при зміні виду транспорту» [6, с. 18];

– «Інтермодальні перевезення» визначають як «переміщення товарів в одній і тій же вантажній одиниці або транспортному засобі, який використовує послідовно два або більше видів транспорту без переміщення самих вантажів у змінних режимах» [3, с. 5].

У міжнародному законодавстві, зокрема у країнах ЄС, інтермодальні перевезення займають важливе місце і часто розглядаються окремо від мультимодальних, як їх різновид. З огляду на важливість, популярність та доведену практикою ефективність інтермодальних перевезень, відсутність цього поняття у новому українському Законі «Про мультимодальні перевезення» [5] може створити певні труднощі для адаптації національних транспортних стандартів до європейських і міжнародних.

2. У зазначених документах ООН, як встановлено в роботах [1; 2, пп. 4.2, 4.3], також визначено поняття «комбіноване перевезення», яке трактується так:

– «Комбіноване перевезення (combined transport): інтермодальне перевезення, в рамках якого велика частина європейського рейсу припадає на залізничний, внутрішній водний або морський транспорт, а будь-який початковий і/або кінцевий відрізок шляху, на якому використовується автомобільний транспорт, є максимально коротким» [6, с. 18];

– «Комбіновані перевезення» визначаються як «інтермодальні перевезення, де більша частина європейського шляху здійснюється залізницею, внутрішніми та водними або морськими шляхами, а будь-які початкові або кінцеві етапи, що здійснюються автомобільним транспортом, є якомога коротшими»² [3, с. 5].

І в першому, і в другому варіантах визначення цього поняття насамперед зазначено, що «комбіноване перевезення» – «це інтермодальне перевезення». Тобто таке перевезення, якого в Україні ніби й не існує відповідно до нового Закону «Про мультимодальні перевезення».

² «Combined Transport» is defined as “intermodal transport where the major part of the European journey is by rail, inland and waterways or sea and any initial or final legs carried out by road are as short as possible». See document TRANS/WP.24/2000/1 [3, с. 5]

Таким чином, привертає увагу дуже цікавий факт, а скоріше нове термінологічне протиріччя між трактуванням терміна «комбіновані перевезення» у міжнародному контексті та вітчизняним розумінням цього поняття. У майбутньому це протиріччя та неузгодженість із міжнародними документами може спричинити певні суперечки у правовому та організаційному аспектах мультимодальних перевезень.

Детальніше.

У новому Законі України «Про мультимодальні перевезення» [5] присутнє таке поняття, як «комбіновані перевезення», яке визначається так:

«Комбіноване перевезення вантажів – мультимодальне перевезення вантажів однією і тією самою транспортною одиницею без перевантаження вантажу при зміні виду транспорту, де більша частина маршруту приходить на морський, річковий або залізничний транспорт, а відрізок маршруту автомобільним транспортом є максимально коротким» [5].

Використання такого поняття у Законі України «Про мультимодальні перевезення» – дуже позитивний факт і, безумовно, крок до гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами. Проте гармонізація законодавства в контексті правознавства, економіки, транспорту та міжнародної торгівлі – це процес цілеспрямованого узгодження та приведення національних законів, стандартів, або норм у відповідність до міжнародних або регіональних норм та стандартів [7]. Це робиться з метою усунення розбіжностей між правовими системами різних країн або регіонів, полегшення взаємодії, співпраці та торгівлі, якісного зменшення суперечностей у законодавстві, дотримання міжнародних, європейських та національних правових стандартів. Гармонізація спрямована на створення єдиних або схожих правил, що дозволяє уникнути правових колізій, забезпечити більш ефективне регулювання та створити сприятливі умови для міжнародного співробітництва. «За допомогою гармонізації законодавства можна досягнути взаємоузгодженості правових систем або їх структур, частин у межах певної спільноти» [8, с. 50]. Тут варто згадати про Європейську комісію «За демократію через право» (далі – Венеціанська комісія), яка є загальноновизнаним європейським та світовим дорадчим юридичним органом Ради Європи з питань права. Особливе значення мають висновки Венеціанської комісії з питань, які стосуються відповідності європейським стандартам проєктів національних законодавчих актів або законів. До речі, Україна є членом Венеціанської комісії [9], що надає їй право звертатися до цього консультативного органу Ради Європи. Венеціанська комісія у своїй діяльності наголошує, що, як процес приведення системи нормативно-правових приписів у певну відповідність, гармонізація законодавства базується на науковості, методологічних засадах цілісності, єдності, узгодженості та досконалості, завершеності та пропорційності [8, с. 50]. Після зробленої ремарки, повертаючись до Закону України «Про мультимодальні перевезення», привертає увагу таке:

по-перше, у практиці міжнародних перевезень та у відповідних джерелах [3; 6], що розроблені ООН та використовуються в роботі таких міжурядових організацій, як EU, ЕСМТ і UN / ЕСЕ, простежується відношення логічного

підпорядкування між поняттями «мультимодальне перевезення», «інтермодальне перевезення» і «комбіноване перевезення» [1; 2]. Своєю чергою, у новому Законі України «Про мультимодальні перевезення», на жаль, такої логіки, чіткості та системності немає, а також взагалі відсутнє поняття «інтермодальні перевезення»;

по-друге, у джерелах міжнародного рівня [3; 6] термін «комбіновані перевезення» визначено через поняття «інтермодальні перевезення», а у Законі України «Про мультимодальні перевезення» дефініція цього терміна сформульована через поняття «мультимодальні перевезення». Така підміна понять на рівні національного законодавства відразу призводить до термінологічної плутанини, яка у майбутньому матиме негативні наслідки в частині організації та практичної реалізації таких перевезень;

по-третє, в Законі України «Про мультимодальні перевезення» спостерігається спроба вітчизняних законотворців не тільки «посягти» термінологічну плутанину, а й посилити її змістовно. Це відбувається через об'єднання в одному понятті «комбіновані перевезення» відразу двох визначень, які використовуються у міжнародному контексті відповідно до [3; 6], а саме:

– перша половина визначення поняття «комбіноване перевезення» містить ознаки інтермодальних перевезень відповідно до міжнародної дефініції цього терміна [3; 6];

– друга половина визначення поняття «комбіноване перевезення» містить ознаки комбінованих перевезень відповідно до [3; 6].

Розглянемо більш детально поняття «комбіноване перевезення» та його визначення у Законі України «Про мультимодальні перевезення». Для цього скористаємося логічною операцією поділу понять, а саме:

– розіб'ємо визначення поняття «комбіноване перевезення» на окремі структурні частини (рис. 1);

– порівняємо зміст отриманих структурних частин з дефініціями, що містяться у документі ООН під назвою «Термінологія комбінованих перевезень» (Terminology on combined transport) [6] на предмет узгодженості відповідної термінології. Оскільки відомо [6, с. 2], що цей документ офіційно призначений для роботи таких міжурядових організацій, як EU, ECMT і UN/ECE, а також для узгодження відповідної термінології на національному та міжурядовому рівнях (рис. 1);

– відповімо на питання, чи узгоджена відповідна термінологія, яка використовується у розглянутому Законі України, з міжнародним контекстом, європейськими та світовими практиками реалізації мультимодальних, інтермодальних та комбінованих перевезень.

Таким чином, графічна візуалізація структурних частин дефініції «комбіноване перевезення» відповідно до Закону України «Про мультимодальні перевезення» (рис. 1) та їх порівняльний аналіз з визначеннями окремих термінів «інтермодальне перевезення» і «комбіноване перевезення», що використовуються в роботі міжурядових організацій ЄС, візуально та інформативно доводять факт термінологічної неузгодженості національного законодавства з прийнятими в ЄС документами в частині мультимодальних, інтермодальних та комбінованих перевезень вантажів.

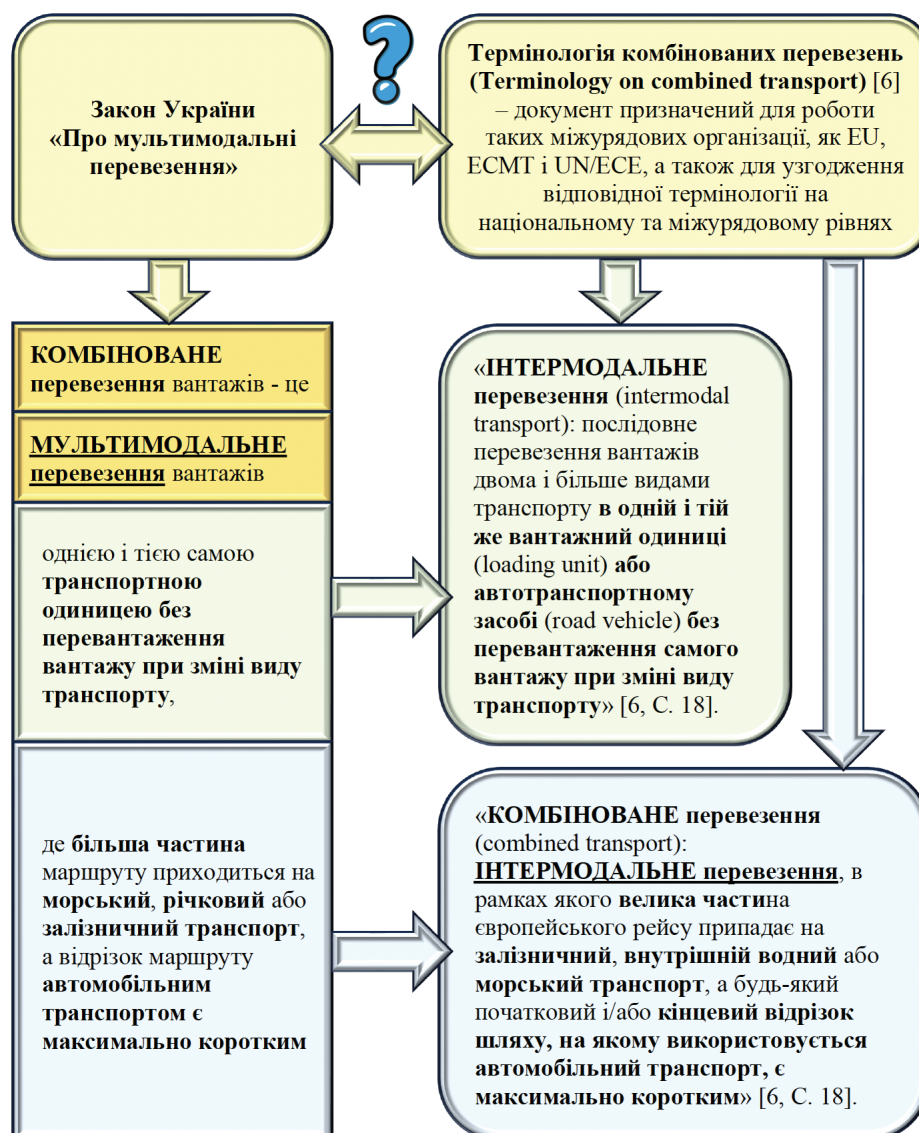


Рис. 1. Графічна візуалізація структурних частин дефініції «комбіноване перевезення» відповідно до Закону України «Про мультимодальні перевезення» та порівняння цих частин з визначеннями окремих термінів у документі [6]

На підставі результатів такого аналізу виникає низка питань.

Якщо «комбіноване перевезення вантажів» відповідно до Закону України «Про мультимодальні перевезення» – «це мультимодальне перевезення вантажів однією і тією самою транспортною одиницею³ без перевантаження вантажу при зміні виду транспорту, де більша частина маршруту приходить на морський,

³ «Транспортна одиниця – контейнер, знімний кузов, причіп, напівпричіп, а також вантажний автомобіль чи залізничний вагон, за умови що вони перевозяться (слідують) іншими видами транспорту без перевантаження вантажу» / Закону України «Про мультимодальні перевезення». – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20?find=1&text=пасажирів#w1_1

річковий або залізничний транспорт, а відрізок маршруту автомобільним транспортом є максимально коротким», то:

– як назвати перевезення вантажу, який не розміщений у «транспортній одиниці», проте його перевезення «здійснюються кількома видами транспорту з використанням документа мультимодального перевезення», про що сказано у п. 1, ст. 913 «Мультимодальні перевезення» Господарського кодексу України [10]?

– як назвати перевезення вантажу двома і більше видами транспорту в одній і тій же транспортній одиниці (відповідно до Закону України «Про мультимодальні перевезення»), вантажній одиниці (loading unit) або автотранспортному засобі (road vehicle) (відповідно до [3; 6]) без перевантаження самого вантажу при зміні виду транспорту», у тому разі, якщо «відрізок маршруту автомобільним транспортом ...» не «... є максимально коротким»? Тобто в ситуації, коли не виконується одна з основних ознак комбінованого перевезення. Виходить, що такі перевезення взагалі не розглядаються у Законі України «Про мультимодальні перевезення» та не регулюються ним? Проте під час війни в Україні, коли більшість українських портів заблоковано або функціонує в обмежених та дуже небезпечних умовах, велика частка перевезень здійснюється за новими мультимодальними маршрутами, де автомобільний транспорт «закриває» досить великі за протяжністю ділянки загальних транспортно-технологічних схем доставки вантажів.

Слід зазначити, що коректна ідентифікація виду перевезення є особливо важливою для Європи, де комбіновані перевезення – це не просто термін. Організація та реалізація саме комбінованих перевезень розглядаються в ЄС як дієвий механізм зменшення завантаження європейських доріг та переміщення більшої частини «подорожі» автотранспортних засобів з автомобільних маршрутів на мережі залізничних, а також морських та внутрішніх водних шляхів. Із цієї причини ще у 1997 році Європейська Конференція Міністрів Транспорту (European Conference of Ministers of Transport) прийняла Резолюцію № 97/6 Про розвиток комбінованих перевезень (Resolution No.97/6 on the Development of Combined Transport), згідно з якою автомобільним перевізникам пропонуються звільнення від податків пропорційно кількості поїздок, що транспортні засоби таких перевізників виконують залізницею, морем або внутрішніми водними шляхами в рамках комбінованих перевезень. Проте такі автоперевізники повинні надати компетентному органу документальне підтвердження того, що виконане перевезення дійсно є комбінованим. Наприклад, якщо частина подорожі здійснюється на борту судна типу ро-ро, документальне підтвердження має бути у формі накладної CMR, яка має містити примітку «транспортування до судна» («transport to ship») та вказувати передбачуваний порт завантаження, судно та порт розвантаження. Крім того, другий оригінал накладної повинен містити позначку «на борту» («on board») оператора судна типу «ро-ро» із зазначенням дати заїзду на судно, порту завантаження, порту розвантаження зі штампами портових влад, відповідати статті 35 Конвенції Про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (Конвенції CMR) / Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road (The CMR Convention) [11]. Тобто наведений приклад підтверджує, що кожний термін має чіткий зміст, який характеризує певні правові, організаційні, технологічні і фінансові особливості та зумовлює відповідні наслідки.

3. Привертає увагу те, що у статті 22 «Прикінцеві положення» Закону України «Про мультимодальні перевезення» [5] йдеться про внесення змін до низки законодавчих актів України, зокрема до Господарського кодексу України (Відомості Верховної Ради України, 2003 р., №№ 18-22, ст. 144) [10], а саме в частині статті 913 «Мультимодальні перевезення». Відповідно до цієї статті поняття «мультимодальні перевезення» розкривається через таке:

«1. Перевезення вантажу, багажу, пошти здійснюються кількома видами транспорту з використанням документа мультимодального перевезення.

2. Перевезення пасажирів може здійснюватися кількома видами транспорту за єдиним транспортним документом або за документом мультимодального перевезення. Відносини організацій, підприємств транспорту, що здійснюють мультимодальні перевезення, визначаються за домовленістю між ними.

3. Відносини організацій, підприємств транспорту, що здійснюють мультимодальні перевезення, перевезення пасажирів, визначаються Законом України "Про мультимодальні перевезення" та іншими актами цивільного законодавства».

Отже, п. 1, ст. 913 Господарського кодексу України уточнює, що таке мультимодальні перевезення з точки зору об'єктів перевезення (предмета договору, предмета праці підприємства) – це «перевезення вантажу, багажу, пошти», які «здійснюються кількома видами транспорту з використанням документа мультимодального перевезення». Щодо п. 2 ст. 913 Господарського кодексу України, то викликає деякі непорозуміння законодавча можливість «перевезення пасажирів <...> за документом мультимодального перевезення», який зазвичай оформлюється на перевезення вантажів. Складно, наприклад, уявити, що для перевезення пасажирів будуть оформлювати коносамент або транспортну накладну. Створює певні сумніви також зміст п. 3 ст. 913 Господарського кодексу України, де міститься відсилання до Закону України «Про мультимодальні перевезення» в частині «Відносин організацій, підприємств транспорту, що здійснюють мультимодальні ... перевезення пасажирів», поряд із тим, що Закон України «Про мультимодальні перевезення» явно стосується вантажних, а не пасажирських перевезень. Причина того, що мультимодальні перевезення здебільшого стосуються вантажів, полягає у специфіці та вимогах міжнародної торгівлі й транспортної логістики, які зумовлюють наявність відповідного правового поля. Часто вантажі вимагають спеціалізованих технологічних рішень для їх транспортування, таких як використання контейнерів, рефрижераторів або спеціальних платформ для негабаритних вантажів. Мультимодальні перевезення дозволяють компаніям інтегрувати, узгодити та скоординувати роботу різних видів транспорту, мінімізувати транспортні витрати, скоротити час доставки та забезпечити безпеку і надійність поставок. Це особливо важливо в міжнародній торгівлі, де товар повинен проходити через різні митні процедури, змінювати вид транспорту та зберігати якість протягом усього маршруту. Таким чином, організація та реалізація процесів доставки вантажів потребують більш складного управління, спеціалізованих рішень та інтеграції різних видів транспорту, що й визначає ключову роль мультимодальних перевезень у світовій економіці. Крім того, очевидним є факт, що перевезення вантажів декількома видами транспорту – це не єдина ознака, за якою перевезення може вважатися «мультимодальним». Своєю чергою, перевезення пасажирів також може здійснюватися декількома видами транспорту (наприклад, подорож, яка

включає літак, потяг та автобус), проте це не означає, що таке перевезення має називатися «мультиmodalьним», враховуючи визначення цього поняття та його ознаки (єдиний документ, єдиний оператор мультиmodalьного перевезення). Крім того, перевезення пасажирів зазвичай не потребують складних технологічних рішень. Переміщення пасажирів рідко передбачає використання спеціалізованих транспортних засобів або обладнання, необхідного для вантажів. Таким чином, основна різниця полягає в тому, що пасажирські перевезення орієнтовані на забезпечення зручності та комфорту пасажирів під час їхніх індивідуальних подорожей, тоді як мультиmodalьні перевезення вантажів відіграють важливу роль у транспортному забезпеченні глобальної економіки та міжнародної торгівлі, фокусуються на забезпеченні ефективних технічних, технологічних, економічних та екологічних рішень щодо безпечної та надійної доставки вантажів від дверей до дверей без необхідності переривання ланцюга поставок. Більше того, вантажі часто вимагають спеціальних умов транспортування (наприклад, контроль температури, захист від ударів), що не стосується пасажирських перевезень. У зв'язку з цим до пасажирських перевезень, які реалізуються декількома видами транспорту, на наш погляд, доречно використовувати словосполучення «пасажирське перевезення у змішаному сполученні» або «змішане перевезення пасажирів». Не потрібно у випадку пасажирських перевезень замінити поняття «змішане перевезення» на «мультиmodalьне перевезення», тим самим провокуючи правові колізії та посилюючи «масштаб катастрофи», пов'язаної з некоректним вживанням транспортної термінології.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямку.
Таким чином:

1. Прийняття Закону України «Про мультиmodalьні перевезення» знаменує суттєві зміни в нормативно-правовому регулюванні цієї сфери діяльності і є суттєвим кроком на шляху до:

- модернізації транспортної системи країни та її інтеграції в європейську транспортну мережу;
- гармонізації правової бази у сфері транспортних технологій і систем з міжнародними стандартами.

2. Реалізація Закону України «Про мультиmodalьні перевезення» дозволить Україні стати важливим транзитним хабом між Європою та Азією, а також сприятиме розвитку внутрішнього ринку транспортних послуг.

3. Визначення поняття «мультиmodalьне перевезення» у Законі України «Про мультиmodalьні перевезення» відповідає багатьом міжнародним нормам, а також має свої особливості.

4. Водночас відсутність у Законі України «Про мультиmodalьні перевезення» поняття «інтерmodalьне перевезення» вказує на прогалини в адаптації українського законодавства до сучасних світових та європейських практик. Це може створити додаткові виклики для українських перевізників у міжнародному контексті, оскільки інтерmodalьні перевезення часто є ключовими в оптимізації логістичних ланцюгів, систем доставки вантажів та окремих технологічних процесів і операцій.

5. Визначення терміна «комбіновані перевезення» через поняття «мультиmodalьні перевезення» у Законі України «Про мультиmodalьні перевезення» і через

поняття «інтермодальні перевезення» у джерелах міжнародного рівня [3; 6] демонструє підміну понять та зумовлює термінологічну колізію, яка у майбутньому матиме негативні наслідки в частині організації та практичної реалізації відповідних перевезень.

6. Об'єднання в одному понятті «комбіновані перевезення» у Законі України «Про мультимодальні перевезення» відразу двох визначень, які використовуються у міжнародному контексті [3; 6] для позначення окремо «інтермодальних» і «комбінованих» перевезень (рис. 1), також інформативно доводить факт термінологічної неузгодженості національного законодавства з прийнятими в ЄС документами в частині мультимодальних, інтермодальних та комбінованих перевезень вантажів.

7. З огляду на отримані результати дослідження та зроблені висновки, для подальшого розвитку мультимодальних перевезень в Україні доцільно рекомендувати спрямувати зусилля на:

- продовження гармонізації українського законодавства в транспортній сфері з відповідними європейськими стандартами;
- вдосконалення нормативно-правової бази України, зокрема Закону України «Про мультимодальні перевезення», відповідно до кращих світових та європейських практик, наприклад, шляхом введення та чіткого визначення терміна «інтермодальне перевезення»;
- імплементацію Закону України «Про мультимодальні перевезення»;
- співпрацю з міжнародними партнерами та авторитетними дорадчими органами Ради Європи з питань права щодо гармонізації національного законодавства у сфері транспорту;
- впровадження цифрових технологій у сфері мультимодальних перевезень;
- забезпечення умов для залучення іноземних інвестицій та підтримки вітчизняних операторів мультимодальних перевезень.

Це дозволить: створити сприятливе нормативно-правове середовище; підвищити ефективність національної транспортної системи; сприятиме розвитку інновацій у сфері транспортних технологій і систем; забезпечити умови для інтеграції України у глобальний транспортний простір.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кириллов Ю.І., Кириллова О.В. Змішані перевезення в умовах інтеграції транспортних комунікацій: проблеми термінології. *Методи та засоби управління розвитком транспортних систем* : зб. наук. праць. Одеса : ОНМУ, 2011. Вип. 17. С. 64–96.
2. Кириллова О.В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. Одеса, 2017. 470 с.
3. Implementation of multimodal transport rules / UNCTAD / SDTE / TLB / 2, 25.06.2001. URL: http://resources.lawyersjurists.com/wp-content/uploads/2010/11/posdtetlbd2.en_pdf.
4. UN Convention on International Multimodal Transport of Goods. United Nations, 2001. 55 p. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17_en.pdf.

5. Про мультимодальні перевезення : Закон України від 17.11.2021 № 1887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>.
6. Terminology on combined transport / ECE/ TRANS / NONE / 2001 / 7. Sales № GV.E/F/G/R.01.0.20. ISBN 92-1-002113-4. Languages: E / F / G / R. 69 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/wp24/documents/term.pdf>.
7. Клещенко Н.О. Уніфікація та гармонізація законодавства: порівняльно-правовий аспект. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2022. № 4. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-4/5>.
8. Клещенко Н.О. Уніфікація законодавства: теоретико-прикладні аспекти : дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.01. Київ, 2020. 204 с.
9. Members of the Venice Commission. URL: <https://www.venice.coe.int/WebForms/members/countries.aspx?lang=EN>.
10. Господарський кодекс України. *Відомості Верховної Ради України*. 2003. № 18–22. Ст. 144. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text>.
11. Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road (The CMR Convention). URL: https://unece.org/DAM/trans/conventn/cmr_e.pdf.

REFERENCES

1. Kyryllov Yu.I., Kyryllova O.V. Mixed transportation in the context of the integration of transport communications: problems of terminology // *Methods and means of managing the development of transport systems: coll. of science works – Odesa: ONMU, 2011. Vol. 17. P. 64–96.*
2. Kyryllova O.V. Theoretical foundations of the fleet operation management in the transport – technological systems: thesis ... dr. tech. of science: 05.22.01. Odesa, 2017. 470 p.
3. Implementation of multimodal transport rules / UNCTAD / SDTE / TLB / 2, 25.06.2001. URL: http://resources.lawyersjurists.com/wp-content/uploads/2010/11/posdtetlbd2.en_pdf.
4. UN Convention on International Multimodal Transport of Goods. United Nations, 2001. 55 p. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17_en.pdf.
5. Law "On Multimodal Transportation". Document 1887-IX, adopted on November 17, 2021; entry into force 19.12.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>.
6. Terminology on combined transport / ECE/ TRANS / NONE / 2001 / 7. Sales № GV.E/F/G/R.01.0.20. ISBN 92-1-002113-4. Languages: E / F / G / R. 69 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/wp24/documents/term.pdf>.
7. Kleshchenko N.O. Validation and harmonization of legislation: comparative legal aspect. *Legal scientific electronic journal*. № 4/2022. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-4/5>.
8. Kleshchenko N.O. Unification of legislation: theoretical and applied aspects: thesis. ... candidate law Sciences: 12.00.01. Kyiv, 2020. 204 p.

9. Members of the Venice Commission. URL: <https://www.venice.coe.int/WebForms/members/countries.aspx?lang=EN>.
10. Economic Code of Ukraine. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine. 2003. №№ 18-22, art. 144. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text>.
11. Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road (The CMR Convention). URL: https://unece.org/DAM/trans/conventn/cmr_e.pdf.

РОЗВИТОК МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
ЗА СУЧАСНИХ УМОВ

Ю.В. Шульдінер¹, Г.О. Примаченко², С.В. Петрик³, Г.С. Пащенко⁴

¹к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6418-998X

²к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7326-8997

³аспірант кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0009-0001-5573-9828

⁴аспірант кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0009-0008-7699-2399

Анотація

Вступ. Мультимодальні перевезення є ключовим елементом сучасної логістики та транспортної індустрії, що сприяє оптимізації та ефективності переміщення вантажів. Такий вид транспортування стає більш привабливим як для інвесторів, так і для перевізників. Тому дослідження можливостей мультимодальних перевезень стосовно України має велику актуальність. **Мета.** Головним завданням дослідження є проведення аналізу сучасного стану мультимодальних перевезень та можливостей їх розвитку в Україні. Для його виконання необхідно проаналізувати історичні аспекти розвитку мультимодальних перевезень та визначити їх ключові тенденції для розуміння перспектив подальшого розвитку такого виду перевезень, у тому числі в рамках логістичних ланцюгів. Також буде доцільним дослідження нових технологій, підходів та їхнього впливу на покращення перевізних процесів. **Результати.** У цій статті розглянуто різні аспекти мультимодальних перевезень в сучасних умовах. Починаючи з огляду історії та розвитку цієї галузі, стаття розглядає переваги мультимодальних перевезень, такі як ефективність та економічність, а також виклики, з якими вони стикаються, зокрема технологічні обмеження та легіслативні аспекти. У статті також розглянуто сучасні тенденції у мультимодальних перевезеннях, включаючи використання новітніх технологій та розвиток електронних логістичних платформ. На прикладах успішних реалізацій продемонстровано значення мультимодальних перевезень для сучасного глобального логістичного ринку. **Висновки.** Мультимодальні перевезення нині уже є невід'ємною частиною сучасної логістики. Подальшому розвитку цього виду транспортування сприяють значні технологічні досягнення та інновації. Зважаючи на швидко зростаючі глобалізацію та обсяги міжнародної торгівлі, варто розраховувати на підвищення значення мультимодальних перевезень. Приклади ефективних підходів до розвитку

транспортної системи є у США та країнах Євросоюзу, тому варто враховувати їхній досвід. Це дасть змогу повною мірою використовувати потенціал України як країни-транзитера та, відповідно, прискорити економічне відновлення країни.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, ефективність, технології, потенціал, процес, розвиток, оптимізація перевізного процесу.

DEVELOPMENT MULTIMODAL TRANSPORTATION IN MODERN CONDITIONS

J.V. Shuldiner¹, H.O. Prymachenko², S.V. Petryk³, G.S. Pashchenko⁴

¹Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6418-998X

²Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-7326-8997

³Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0009-0001-5573-9828

⁴Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0009-0008-7699-2399

Summary

Introduction. Multimodal transportation is a major element of the modern logistics and transport industry, facilitating to the optimization and efficiency of the movement of cargo and passengers. This type of transportation becomes more attractive for both investors and carriers. Therefore, the study of the possibilities of multimodal transportation in relation to Ukraine is of great relevance. **Purpose.** The main task of the research is to conduct an analysis of the current state of multimodal transportation and opportunities for their development in Ukraine. For its implementation, it is necessary to analyze the historical aspects of the development of multimodal transportation and determine their main trends in order to understand the prospects for the further development of this type of transportation, including within the framework of logistics chains. It will also be appropriate to study new technologies, approaches and their impact on the optimization of transportation processes. **Results.** This article examines various aspects of multimodal transportation in modern conditions. Starting with an overview of the history and development of the industry, the article notes the benefits of multimodal transportation, such as efficiency and cost-effectiveness, as well as the challenges it faces, such as technological limitations and legislative aspects. The article also discusses modern trends in multimodal transportation, including the use of the latest technologies and the development of electronic logistics platforms. Examples of successful implementations demonstrate the importance of multimodal transportation for the modern global logistics market. **Conclusions.** Today, multimodal transportation is already an integral part of modern logistics. Further development of this type of transportation is facilitated by significant technological achievements and innovations.

Taking into account the rapidly growing globalization and volumes of international trade, it is worth counting on an increase in the importance of multimodal transportation. Examples of effective approaches to the development of the transport system are the USA and the countries of the European Union, so their experience should be taken into account. These measures will allow full use of the potential of Ukraine as a transit country and, accordingly, will accelerate the country's economic recovery.

Key words: *multimodal transportation, efficiency, technologies, potential, process, development, optimization of the transportation process.*

Вступ. Мультимодальні перевезення – це система організації та здійснення перевезень, що використовує різні види транспорту та логістичні мережі для ефективного переміщення вантажів від точки відправлення до пункту призначення. У сучасному світі мультимодальні перевезення стають все більш популярними і важливими, оскільки вони дозволяють знижувати витрати, оптимізувати логістичні процеси та забезпечувати сталий розвиток.

Постановка проблеми. За останні двадцять років напрями вантажопотоків, що проходили через Україну, зазнали значних змін. Але найбільшим викликом для перевізників стали ускладнення морських перевезень у зв'язку з блокуванням портів та бойовими діями. Тому постала необхідність налагодити у найкоротші терміни перевезення через сухопутні кордони. Враховуючи, що ці шляхи широко не використовувалися, актуалізувалася низка проблем, однією з яких є різна ширина колії.

Мультимодальні перевезення передбачають наявність спеціалізованих терміналів. В Україні подібні вантажні хаби існують, але здебільшого вантажі оброблюються застарілими методами та пристроями. Тому доцільно розглянути можливості автоматизації процесів та обладнання, за допомогою якого можна здійснити обробку вантажів більш ефективно та прискорити їх просування.

Автоматизація обладнання може включати в себе впровадження різноманітних технологій, таких як автоматизовані сортувальні системи, роботизовані маніпулятори для завантаження та розвантаження вантажу, системи автоматичного складування і переміщення. Наприклад, автоматизація може дозволити значно зменшити час обробки вантажів, знизити ризик пошкоджень та збільшити загальну ефективність логістичних процесів. Застосування цих технологій і підходів може сприяти не лише покращенню швидкості перевезень, але й зниженню витрат та удосконаленню загального рівня обслуговування клієнтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття висвітлює дуже важливе питання, оскільки в Україні у сфері транспортних послуг мультимодальні перевезення стають все більш популярними і мають великий потенціал для подальшого розвитку. Хоча значна кількість наукових публікацій [1–4] присвячена цій темі, окремі аспекти мультимодальних перевезень ще потребують глибокого дослідження для досягнення повного розуміння їхнього потенціалу та ефективного використання. Наприклад, це може включати вивчення ефективних маршрутів та залучення різних видів транспорту, розробку ефективних моделей логістики та управління ланцюгами постачання, а також удосконалення інфраструктури для підтримки мультимодальних перевезень.

Такі дослідження допоможуть розкрити потенціал мультимодальних перевезень та сприятимуть розвитку ефективних стратегій використання цього типу транспорту. Відповідне розуміння та впровадження нових технологій та методик може покращити логістичні процеси та сприяти розвитку економіки країни.

У роботах таких вчених, як В. Караваєв, Г. Кириченко, П. Підлісний [5], К. Плужников, О. Соколова, С. Ширяєва [6], Н. Шраменко [7] та інші, розкриті теоретичні та прикладні аспекти розвитку мультимодальних перевезень, а також особливості їх правового регулювання. У своїх дослідженнях вони звернули увагу на важливі аспекти цієї теми та зробили вагомий внесок у розвиток наукового підґрунтя у цій галузі. Крім того, проблематиці міжнародних і транзитних вантажних перевезень, а також розвитку транзитних можливостей України та її регіонів було приділено увагу в роботах таких вчених, як Б. Буркинський [8], Т. Блудова, О. Камчатний, А. Новікова, А. Пасічник, С. Пирожков, С. Шаповал, та інших. Вони провели дослідження, які сприяли розширенню знань про можливості та перспективи розвитку транзитних маршрутів та їхній вплив на економіку країни.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є аналіз сучасного стану мультимодальних перевезень, їхнього впливу на логістичні процеси у сучасних умовах та підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень – ключового напрямку для підтримки економіки України під час війни та її відновлення і розвитку після завершення бойових дій. Для досягнення цієї мети потрібно провести аналіз історичного розвитку та сучасного стану мультимодальних перевезень з метою визначення ключових тенденцій та перспектив їх подальшого розвитку. Проаналізувати переваги та недоліки використання мультимодальних перевезень у логістичних ланцюгах, зокрема їхній вплив на ефективність, економічність та сталість. Дослідити новітні технології, методи та підходи, що застосовуються в мультимодальних перевезеннях, і їх вплив на оптимізацію логістичних процесів. Проаналізувати приклади успішної інтеграції мультимодальних перевезень у логістичні ланцюги та їх вплив на підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Виклад основного матеріалу. Історія мультимодальних перевезень налічує декілька етапів, що відображають розвиток транспортних та логістичних технологій. Початки мультимодальних перевезень можна віднести до епохи торгівлі на великих відстанях, коли для доставки товарів використовувалися різні види транспорту: морський, річковий, залізничний та дорожній. Протягом минулих десятиліть відбулися значні зміни у сфері мультимодальних перевезень. Зростання технологій, глобалізація економіки та збільшення обсягів торгівлі призвели до збільшення складності та обсягів логістичних потоків. Інтеграція різних видів транспорту та розробка новітніх технологій сприяють подальшому розвитку мультимодальних перевезень у сучасному світі.

Розвиток мультимодальних перевезень в Україні визначається як перспективний напрям у зміцненні транспортної системи країни. Цей напрям дозволяє значно збільшити обсяги перевезень через територію України за участю національних транспортних компаній. Такий підхід сприяє підвищенню конкурентоспроможності країни на міжнародному ринку транспортних послуг і сприяє розвитку мережі наявних транспортних коридорів. Крім того, він сприяє інтеграції транспортної інфраструктури України у світову транспортну систему, що сприятиме

покращенню ефективності та розвитку національної економіки. Аналізуючи інформацію, наведену в Таблиці 1, можна зробити висновок, що для переміщення вантажів використовуються різні види транспорту, серед яких фаворитом виступає залізничний транспорт.

Таблиця 1

Вантажообіг за видами транспорту
Tonne-kilometres performed, by type of transport

| (млн.ткм/mln.tkm) | | | | | |
|-------------------|-------------------------|------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| Роки | Залізничний/ Railway | Морський/ Sea | Річковий/ River | Автомобільний/ Motor vehicles | Авіаційний/ Air |
| 2016 | 187557,5 | 2538,7 | 1465,0 | 58029,8 | 226,4 |
| 2017 | 191914,1 | 2848,6 | 1422,9 | 62296,8 | 275,3 |
| 2018 | 186344,1 | 1822,8 | 1540,2 | 72068,3 | 339,7 |
| 2019 | 181844,7 | 1773,9 | 1613,8 | 64952,9 | 295,6 |
| 2020 | 175587,1 | 1504,4 | 1372,9 | 65176,9 | 316,2 |

Джерело: Державна служба статистики України

Україна мала потенціал у 2022 році встановити новий рекорд за обсягом експорту за весь період незалежності, якби не відбулося вторгнення Росії. У січні – лютому 2022 року експорт зріс на 34 % порівняно з аналогічним періодом 2021 року. Однак уже в березні експортні поставки за кордон значно знизились, зменшившись на половину. Після складного 2022 року обсяг експорту товарів України становив 100 мільйонів тон на загальну суму 44,2 мільярда доларів США, що на 35 % менше, ніж у 2021 році.

У 2022 році найбільш експортованими серед секторів залишалися аграрні та харчові товари, які становили 53 % від загального обсягу експорту. Друге місце за обсягом експорту займали метали, які становили 13,6 %. Третє місце належало сектору мінеральних продуктів, який склав 9,8 % (рис. 1). Найбільш постраждалими секторами виявилися металургія (- 62,5 %), хімічна промисловість (- 54,3 %), видобуток мінералів (- 48,6 %) та виробництво паперу (- 48 %).

Аналіз результатів одного з найскладніших років за період незалежності України показав, що 2022 року Україна здійснила експорт товарів та послуг до 233 країн та територій світу. Основними партнерами України є Польща, Румунія, Туреччина, Китай, Угорщина та Німеччина.

У 2022 році Київ став головним регіоном-експортером (27,1 % від загального експорту України). На другому місці за обсягом експорту була Дніпропетровська область (12 %), за ними йшли Львівська (7,2 %), Одеська (5,6 %) та Запорізька (5,5 %) області (рис. 2).

Блокування перевезень морським транспортом суттєво ускладнило логістику в Україні, особливо в частині зовнішньої торгівлі. Традиційні маршрути доставки, які використовувалися для мультимодальних перевезень, були серйозно підірвані, що вимагало швидкого адаптування до нових умов. У результаті збільшилася значимість сухопутних коридорів, які надійно забезпечують транспортування вантажів сушею, знижуючи вплив затримок і ризиків, пов'язаних з морськими перевезеннями.

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 3(22), 2024

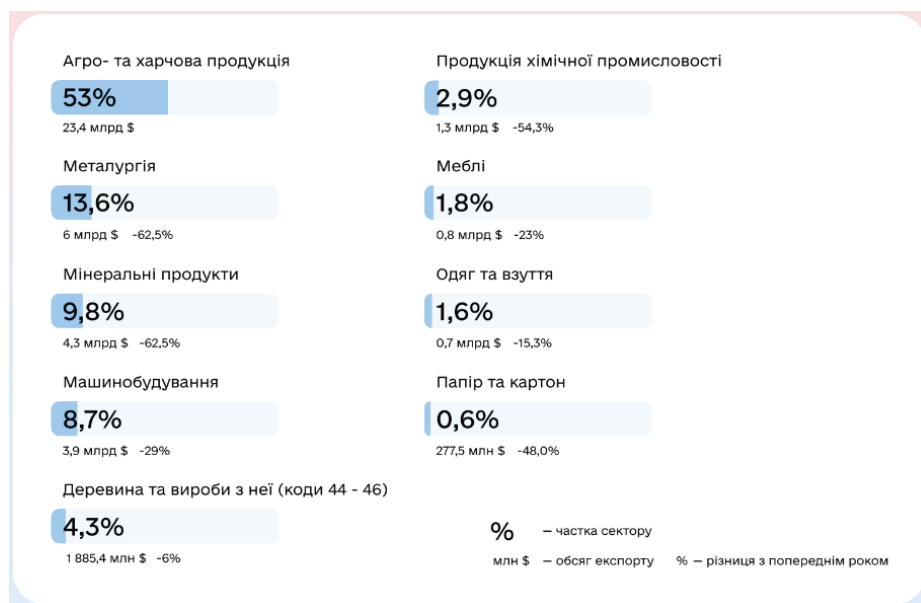


Рис. 1. Експорт товарів у розрізі секторів (2022 р.) [12]

Як виняток можемо навести «Зернову ініціативу», яку було укладено з ООН та Туреччиною, що дозволило розблокувати порти Одеси для залучення морських шляхів.

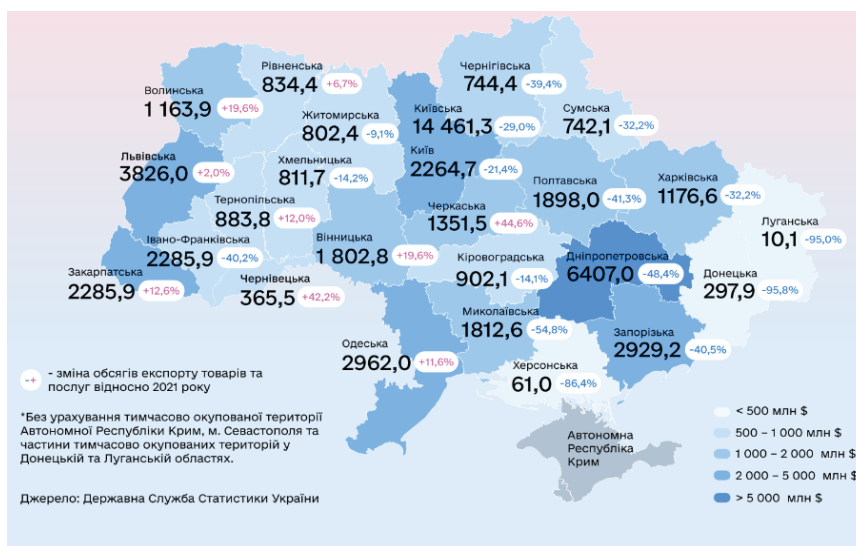


Рис. 2. Експорт України за регіонами у 2022 році [12]

Детально проаналізувавши обсяги імпорту, можна відверто сказати, що значна частка перевезень здійснюється із залученням автомобільного (11 млн тон) та залізничного (9,89 млн тон) транспорту (рис. 3).



Рис. 3. Структура імпорту у 2022 році [13]

Україна має значний транзитний потенціал завдяки своєму стратегічному географічному положенню на перехресті основних транспортних маршрутів між Азією та Європою. Розвинена транспортна інфраструктура, включаючи залізниці, автошляхи та порти, створює можливості для ефективних транзитних перевезень. Україна розташована на перетині важливих транспортних коридорів, що з'єднують Європу з Азією, зокрема таких, як TRACECA (Транспортний коридор Європа-Кавказ-Азія). Завдяки цьому Україна має можливість ефективно обслуговувати транзитні потоки вантажів між двома континентами. Цей потенціал відіграє ключову роль у розвитку національної економіки та інтеграції країни до світових транспортних і логістичних мереж. Сучасні умови визначають як переваги, так і виклики для використання цього потенціалу.

Політичні та економічні виклики, такі як війна в країні та економічні обмеження, впливають на безпеку та стабільність транзитних маршрутів. Для максимального використання транзитного потенціалу необхідні інвестиції у модернізацію інфраструктури та співпраця з міжнародними організаціями. Використання сучасних технологій та створення логістичних центрів також сприятиме підвищенню ефективності транзитних перевезень. Таким чином, розвиток транзитного потенціалу України є ключовим фактором для економічного зростання та інтеграції країни у глобальні транспортні мережі.

Ці фактори впливають на ефективність та привабливість України як транзитної країни.

Ринок мультимодальних перевезень, зокрема контейнерних, є однією з галузей економіки, що найбільш динамічно розвиваються. Наразі середньорічний зріст обсягів контейнерного обігу становить 3–4 %, і такі самі темпи передбачені до 2025 року [5]. Слід зауважити, що більшість контейнерних перевезень у світі здійснюється морським транспортом. Це пояснюється потребою у великих обсягах вантажів, які ефективно забезпечуються за допомогою морського транспорту та властивостей самого контейнеру.

Україна нині в основному використовує залізничний транспорт для перевезення вантажів, що становить 65 % усіх вантажних перевезень та 81 % вантажообігу (за винятком трубопровідного транспорту). Проте більшість контейнерного трафіку перевозиться по території України за допомогою автомобілів. За останні роки

частка автомобільних перевезень у загальному обсязі контейнерних перевезень поступово зменшується, а залізничний транспорт, навпаки, зростає. Наприклад, якщо у 2013 році близько 75 % усіх контейнерів були перевезені автомобілями, то вже у 2015 році частка контейнерів, які транспортуються залізницею, зросла до 35 %, а у портах – до 45 %. Однією з ключових переваг використання автомобільного транспорту є його мобільність, але залізничний транспорт є безпечним, а також значно дешевшим, що має вагоме значення в поточній економічній ситуації України, використання залізничного транспорту позитивно впливає на розвантаження автомобільного трафіку на дорогах України та збільшує термін експлуатації асфальтного покриття, що і так знаходиться подекуди в досить критичному стані.

У минулому році обсяг мультимодальних перевезень залізничним транспортом збільшився на 34 % порівняно з 2022 роком. Починаючи з 2018 року спостерігалася досить позитивна тенденція зростання контейнерних перевезень саме залізничним транспортом. Так, у 2018 році відбулося зростання на 22 % порівняно з попереднім роком, у 2019 році – на 20 %, у 2020 році – на 11 %, а у 2021 році – на 14 %. Проте після повномасштабного вторгнення Росії у 2022 році спостерігається погіршення динаміки. Відбулося падіння на 46 %: у 2021 році було перевезено 279,8 тисячі контейнерів ДФЕ (двадцятифутових контейнерів), у 2022 році – лише 150,1 тисячу. У 2023 році відбулося значне зростання – на 34 %, до 201,3 тисячі ДФЕ (двадцятифутових контейнерів). Із цього обсягу 62 % було перевезено на експорт. Частка імпорту та внутрішніх перевезень становила 19 %. Ці результати виглядають вражаюче порівняно з попереднім роком, але залишаються на досить низькому рівні. Згідно з розробленою стратегією АТ «Укрзалізниця» до 2031 року планує збільшити обсяг перевезень контейнерів до 1 мільйона ДФЕ щорічно.

Для ефективного розвитку перевезення контейнерів АТ «Укрзалізниця» планує реалізувати нову ініціативу, яка допоможе розвивати мультимодальні перевезення у міжнародному сполученні, – збірні потяги, які будуть курсувати за маршрутом «Україна – Польща» та зворотно. Ключовим аспектом цієї ініціативи є забір вантажів з найголовніших портів Польщі – Гданськ та Гдиня – та сусідніх країн, доставка вантажу із залученням автотранспорту у хаби і подальше транспортування на термінали філії «Центр транспортного сервісу «Ліски»: Київ, Одеса, Дніпро, Харків, Сквили.

Отже, український ринок має значний потенціал для розвитку контейнерних перевезень залізничним транспортом. Щоб максимізувати цей потенціал, необхідно модернізувати наявні контейнерні термінали і впровадити сучасні технології. Однією з перспективних технологій є автоматизація інфраструктури терміналів, включаючи автоматизовані системи завантаження і розвантаження контейнерів. Це значно підвищить швидкість обробки вантажів і зменшить час очікування. Крім того, впровадження систем інтернету речей (IoT) і штучного інтелекту (AI) дозволить здійснювати моніторинг і управління логістичними процесами в режимі реального часу. Це сприятиме оптимізації маршрутів, уникненню заторів і зниженню витрат на енергію та ресурси. Такі технології також підтримують створення цифрових платформ для управління логістикою, що спрощує співпрацю між різними учасниками логістичного ланцюга і забезпечує високу точність і прозорість в управлінні вантажами [6].

Незважаючи на численні переваги, мультимодальні перевезення також стикаються з низкою викликів та перешкод, які необхідно вирішувати для досягнення максимальної ефективності. Одним з основних викликів є технологічні обмеження. Інтеграція різних систем та технологій може бути складною через різницю стандартів, інтерфейсів та методів обробки даних. Це може призвести до складнощів у спільній роботі та обміні інформацією між різними учасниками мультимодального логістичного ланцюгу. Легіслативні та регуляторні аспекти є ще однією перешкодою для розвитку мультимодальних перевезень. Різні правила та нормативи, що регулюють логістичні процеси та перевезення різними видами транспорту, можуть ускладнювати взаємодію між різними учасниками ланцюгу постачання та перевезень.

Проблеми взаємодії між різними видами транспорту та логістичними системами також є важливим аспектом, який варто враховувати. Недостатня координація та узгодження робіт між різними операторами та партнерами може призвести до затримок, втрат та неефективного використання ресурсів.

У сучасному світі спостерігається кілька ключових тенденцій, що впливають на розвиток мультимодальних перевезень. Однією з таких тенденцій є використання новітніх технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та аналізу даних, для удосконалення та автоматизації логістичних процесів. Розвиток електронних логістичних платформ та додатків є ще однією важливою тенденцією. Завдяки таким платформам, учасники мультимодального ланцюгу постачання можуть легко спілкуватися, обмінюватися даними та координувати роботу для досягнення кращих результатів. Зростання мультимодальних перевезень, які використовують різні види транспорту, також є важливою тенденцією. Мультимодальні перевезення дозволяють забезпечити більш гнучкий та ефективний підхід до логістики, забезпечуючи кращий вибір транспортних маршрутів та режимів.

На сучасному ринку існують численні приклади успішних реалізацій мультимодальних перевезень, у тому числі залучення штучного інтелекту (AI) до опрацювання певних завдань. Одним із таких прикладів є компанія Amazon, яка активно використовує мультимодальні перевезення для оптимізації доставки товарів своїм клієнтам. Інтеграція різних видів транспорту дозволяє Amazon забезпечувати швидку та ефективну доставку, незважаючи на великі обсяги замовлень. Використовуючи роботизовані системи та штучний інтелект, разом можна досягти ще більшої ефективності логістичних операцій. Наприклад, роботизовані системи можуть співпрацювати зі штучним інтелектом, щоб автоматично перенаправляти вантажі на більш вигідніші маршрути в реальному часі. Це дозволяє компанії бути більш гнучкою та адаптуватися до умов, що змінюються.

Роботизовані системи використовуються для автоматизації різних процесів у логістиці. Наприклад, це може бути автоматизація пакування та сортування вантажів, підйому та переміщення важких вантажів, обслуговування складів та транспортування вантажів на короткі відстані. Amazon використовує роботизовані системи для переміщення товарів по своїх складах (рис. 4). Роботи-AGV (автоматизовані гібридні транспортні засоби) транспортують товари на великі відстані, тоді як роботи-маніпулятори забирають товари з полиць і доставляють їх на конвеєр для подальшої обробки.



Рис. 4. AGV-системи, які використовуються для оптимізації логістичних процесів

Amazon використовує роботів-AGV у поєднанні зі штучним інтелектом для оптимізації маршрутів доставки товарів по складу. Штучний інтелект визначає найефективніший маршрут для кожного вантажу, а роботи-AGV доставляють товари цим маршрутом. Натепер майже 75 % усіх логістичних операцій здійснюється із залученням штучного інтелекту (AI) та є великий потенціал для розвитку і подальшого залучення [9–11].

Іншим прикладом є Maersk, яка використовує інтегровану мережу морських, залізничних та автотранспортних маршрутів для ефективної доставки вантажів. Maersk використовує штучний інтелект для покращення маршрутів доставки контейнерів. Система аналізує дані про розташування контейнерів, стан суден та доріг, а також погодні умови, щоб вибрати найкращий маршрути доставки вантажів.

Висновки. Мультимодальні перевезення стають невід’ємною частиною сучасної логістики та транспортної індустрії. Вони дозволяють оптимізувати процеси перевезень, знижувати витрати та підвищувати ефективність вантажних потоків. Проте для досягнення максимальної вигоди від мультимодальних перевезень необхідно вирішувати ряд викликів, таких як технологічні обмеження, легіслативні аспекти та проблеми взаємодії між учасниками логістичного ланцюгу.

За останні роки мультимодальні перевезення відзначаються значними досягненнями та інноваціями, які сприяють подальшому розвитку цієї галузі. Використання новітніх технологій, розвиток електронних логістичних платформ та інтеграція різних видів транспорту дозволяють забезпечити більш ефективну та гнучку систему перевезень.

У майбутньому можна очікувати подальшого зростання значення мультимодальних перевезень, особливо в контексті швидко зростаючої глобалізації та збільшення обсягів міжнародної торгівлі. Для успішного використання цих перспектив необхідно продовжувати розвивати технології, вдосконалювати логістичні процеси та сприяти співпраці між усіма учасниками ланцюгу постачання та перевезень.

Контейнерні перевезення відіграють важливу роль у підвищенні продуктивності та зниженні вартості перевезення вантажів. Дослідження показує, що в Україні обсяги контейнерних перевезень зростають щороку. Однак порівняно

з розвинутими країнами їхній внесок у загальний обсяг залізничних перевезень залишається дуже низьким. Тому для збільшення обсягів мультимодальних перевезень потрібно впроваджувати ефективні підходи, які зарекомендували себе у США та ЄС. Це стимулюватиме потенційних відправників, включаючи зарубіжних. Крім того, важливо створити сучасні мультимодальні центри на західному кордоні країни, що є необхідною умовою для зростання транзитних перевезень. Для цього держава повинна залучати як українських, так і закордонних інвесторів, надаючи відповідні умови та гарантії для розвитку бізнесу. Побудова ефективної та конкурентоспроможної мультимодальної транспортної системи дозволить реалізувати та зміцнити транзитний потенціал України, перетворивши її на сучасний міжнародний транспортний хаб між Європою та Азією.

ЛІТЕРАТУРА

1. Automation of Work Processes at Ukrainian Sorting Stations / S. Oleh та ін. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Т. 7, № 2.23. С. 516. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.15346> (дата звернення: 16.05.2024).
2. Assessment of Cargo Delivery Quality Using Fuzzy Set Apparatus / Н. Курченко та ін. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Т. 7, № 4.3. С. 262. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19800> (дата звернення: 16.05.2024).
3. Курган М. Досвід експлуатації контрейлерних поїздів у внутрішньому та міжнародному сполученні. *Українська залізниця*. 2016. № 12(42). С. 49–53.
4. Darabant S., Stefanescu P., Crisan R. Economic benefits of developing intermodal transport in the European Union. *Annals of the University of Oradea: Economic Science*. 2012. № 1(2). С. 81–87.
5. Підлісний П.І., Паткевич Н.О., Цвєтов Ю.В. Роль контейнеризації змішаних вантажних перевезень у розвитку світової торгівлі. *Економічний форум*. 2016. № 3. С. 67–81.
6. Shyriaeva S. V., Isaenko V. L., Isaenko G. L. Analysis of the methods of the selection of multimodal terminals dislocation (Eng). *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2021. № 1. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2021-1-31-35> (date of access: 17.05.2024).
7. Шраменко О. В. Мультимодальні перевезення як транспортний пріоритет України. *Вісник економіки транспорту і промисловості* : тези доповідей за матеріалами одинадцятої науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародні транспортні коридори та корпоративна логістика». м. Харків, 11–13 червня 2015 р. УкрДУЗТ, 2015. С. 103–104.
8. Буркинський Б., Андрєєва Н., Грищенко В. Коригування обсягів перевезень вантажів морським та внутрішнім водним транспортом України з урахуванням вимог екологізації соціально-відповідального бізнесу. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-52> (дата звернення: 16.05.2024).

9. Placek M. Global container trade by trade lane 2022 | Statista. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1130550/global-container-trade-by-trade-lane/> (дата звернення: 16.05.2024).
10. Контейнерні перевезення та ринок термінальних послуг на залізниці України – що має змінитися? || Rail EXPO. Міжнародна виставка Rail EXPO UA. URL: <https://railexpo.ua.com/novynu/pro-rynok-terminalnykh-posluh-na-zaliznytsi-ukrainy/> (дата звернення: 16.05.2024).
11. Церковна А. В., Харламова В. В. Тенденції контейнерних перевезень в Україні. *Ринкова економіка: сучасна теорія і практика управління*. 2018. Т. 17, № 1(38). С. 129–143. URL: [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2018.1\(38\).135561](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2018.1(38).135561) (дата звернення: 16.05.2024).
12. Експорт України у 2022 році: головні тенденції, сектори та регіони. URL: https://export.gov.ua/news/4570-eksport_ukraini_u_2022_rotsi_golovni_tendentsii_sektori_ta_reghioni (дата звернення: 16.05.2024).
13. Торгівля 2022 року за видами транспортних перевезень. URL: https://export.gov.ua/news/4413-torgivlia_2022_roku_za_vidami_transportnykh_perevezen (дата звернення: 16.05.2024).

REFERENCES

1. Oleh, S., Hanna, K., Yulia, B., & Svitlana, H. (2018). Automation of Work Processes at Ukrainian Sorting Stations. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.23), 516. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.15346>
2. Kyrychenko, H., Statyvka, Y., Strelko, O., Berdnychenko, Y., & Nesterenko, K. (2018). Assessment of Cargo Delivery Quality Using Fuzzy Set Apparatus. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 262. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19800>
3. Kurgan, M. (2016). Experience in operating counter-trailer trains in domestic and international traffic [Dosvid ekspluatatsii kontreilernykh poizdiv u vnutrishnomu ta mizhnarodnomu spoluchenni.]. *Ukrainska zaliznytsia*, (12(42)), 49–53. [in Ukrainian].
4. Darabant, S., Stefanescu, P., & Crisan, R. (2012). Economic benefits of developing intermodal transport in the European Union. *Annals of the University of Oradea: Economic Science*, (1(2)), 81–87.
5. Pidlisnyi, P., Patkevych, N., & Tsvietov, Yu. (2016). The role of containerization of mixed cargo transportation in the development of world trade [Rol konteineryzatsii zmishanykh vantazhnykh perevezen u rozvytku svitovoi torhivli.]. *Economic Forum*, (3), 67-81. [in Ukrainian].
6. Shyriaeva, S. V., Isaenko, V. L., & Isaenko, G. L. (2021a). Analysis of the methods of the selection of multimodal terminals dislocation (Eng). *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, (1). <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2021-1-31-35>
7. Shramenko, O. V. (2015). Multimodal transportation as a transport priority of Ukraine [Multymodalni perevezennia yak transportnyi priorytet Ukrainy.]. *Bulletin of Transport Economics and Industry*, (50), 103–104. UkrSURT. [in Ukrainian].

8. Burkynskiy, B., Andryeyeva, N., & Gryshchenko V. (2022). Adjustment of cargo volumes transported by Ukrainian maritime and inland water transport, taking into account the requirements of socially responsible business greening. *Economy and Society*, (43). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-52> [in Ukrainian].
9. Placek, M. (2023). Global container trade by trade lane 2022 | Statista. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1130550/global-container-trade-by-trade-lane/>
10. Container transportation and the market of terminal services on railways of Ukraine – what should change? [Konteynerni perevezennia ta rynok terminalnykh posluh na zaliznytsi Ukrainy – shcho maie zminytysia?] | Rail EXPO. International exhibition Rail EXPO UA. <https://railexpoua.com/novyny/pro-rynok-terminalnykh-posluh-na-zaliznytsi-ukrainy/> [in Ukrainian].
11. Tserkovna, A. V., & Kharlamova, V. V. (2018). Trends of container transportation in Ukraine. *Market economy: modern management theory and practice*, 17(1(38)), 129–143. [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2018.1\(38\).135561](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2018.1(38).135561) [in Ukrainian].
12. Export of Ukraine in 2022: Main Trends, Sectors, and Regions. URL: https://export.gov.ua/news/4570-eksport_ukraini_u_2022_rotsi_golovni_tendentsii_sektori_ta_regioni.
13. Trade in 2022 by types of transport. URL: https://export.gov.ua/news/4413-torgivlia_2022_roku_za_vidami_transportnykh_perevezen

НОТАТКИ

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 3(22), 2024

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 11,21.
Замов. № 1024/675. Наклад 200 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 3(22), 2024

Founded by Odessa National Maritime University

In Ukrainian and English

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 11,21.
Order No 1024/675. Edition of 200 copies.

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 7623 as of 22.06.2022