# МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПИТОМОЇ ВИТРАТИ ПАЛИВА МАЛООБЕРТОВИМИ ДВИГУНАМИ СУХОВАНТАЖНИХ СУДЕН

Савчук В.П.✉, Макарчук Д.В., Пошивай І.Г. Дзигар А.К.

*Херсонська державна морська академія, Україна*

***Ключові слова:*** *оптимізація, малообертовий двигун, питома витрата палива, індекс енергоефективності, пропульсивний комплекс*

***Анотація***

*Робота присвячена методу оптимізації питомої витрати палива малообертовими двигунами суховантажних суден з урахуванням сучасних вимог щодо енергоефективності судноплавства. Зменшення впливу викидів парникового газу та споживання палива є важливою метою у морській галузі, зокрема застосуванням індексу енергетичної ефективності для нових суден (EEDI). Робота розглядає методику визначення потужності пропульсивної системи, вплив факторів на питому витрату палива, а також розрахунки на основі конкретного прикладу. Результати досліджень вказують на можливість підвищення економічності дизельних двигунів у діапазоні навантажень до 7800 кВт.*

## Вступ

Однією із цілей у морській галузі сьогодні є зменшення впливу викидів суднами парникового газу $CO_2$ та, відповідно, максимально можливого зменшення споживання палива. Це також означає, що індекс енергетичної ефективності для нових суден (Energy Efficiency Design Index, EEDI), буде зменшуватися. EEDI регламентує кількість $CO_2$, що викидається суднами у відношенні до перевезеного вантажу, і вимірюється в грамах $CO_2$ на DW на морську милю. Значення EEDI розраховується на основі максимальної вантажопідйомності (поки що 70 % для контейнерних суден), потужності пропульсивної системи, швидкості судна, SFOC (питомої витрати палива) та типу палива. Для головного двигуна застосовується 75 % від встановленої максимально тривалої потужності (Specified Maximum Continuous Rating SMCR) для розрахунку показника EEDI, в якому також враховуються викиди $CO_2$ від допоміжних двигунів. Також застосовуються певні коригування, що враховують, наприклад, наявність систем утилізації тепла. Згідно з правилами, остаточно визначеними 15 липня 2011 року, EEDI зводиться до визначення певного фактору в порівнянні з контрольним значенням. Таким чином, судно, контракт на виготовлення якого буде укладено після 1 січня 2025 року, повинно мати на 30 % нижче значення EEDI, ніж референтний показник 2013 року [1].

## Актуальність досліджень

Актуальність дослідження полягає у зростаючій увазі до енергоефективності та екологічної сталості у судноплавстві. Зменшення викидів парникових газів та оптимізація витрати палива стають ключовими завданнями у галузі морського транспорту, особливо з урахуванням строгих нормативних вимог щодо викидів та енергоефективності, встановлених міжнародними організаціями. Розробка методів оптимізації використання палива та визначення потужності пропульсивних систем стає необхідною для судноплавства, щоб забезпечити високу конкурентоспроможність, зменшити витрати та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Такі дослідження є важливим кроком у напрямку створення більш ефективних та екологічно чистих морських транспортних засобів.

## Викладення основного матеріалу

Довідковий індекс для конкретного типу судна розраховується на основі даних суден, побудованих у період з 2000 по 2010 рік. Відповідно до керівних принципів EEDI, запроваджених 1 січня 2013 року, необхідне значення EEDI для нових суден зменшується у три фази. Це призводить до остаточного зниження EEDI на 30% (фаза 3) порівняно з еталонним значенням для судна, побудованого після 2025 року (рис. 1).

Для балкерів референтний та досягнутий EEDI обчислюється на основі 100 % SMCR. Базова швидкість повинна відповідати такому навантаженню судна на рівні 75 % режиму SMCR та корпусу в такому стані, як при ходових випробуваннях [2].

На питому витрату палива SFOC двигуна впливають різні фактори, які можуть підвищити його ефективність і ефективність силової

установки. На термодинамічну ефективність двигуна впливає відношення максимального тиску згоряння до середнього ефективного тиску $p_z/p_e$, при цьому вище його значення призводить до зниження SFOC. Вибір двигуна з вищим значенням SMCR, ніж вимагається для судна, і зниження його до потужності, яка відповідає проектним характеристикам судна призведе до того, що скориговане значення потужності розвиватиметься при нижчому середньому ефективному тиску. Це дозволяє оптимізувати процес згоряння, а не максимізувати вихідну потужність, тим самим покращуючи паливну ефективність.

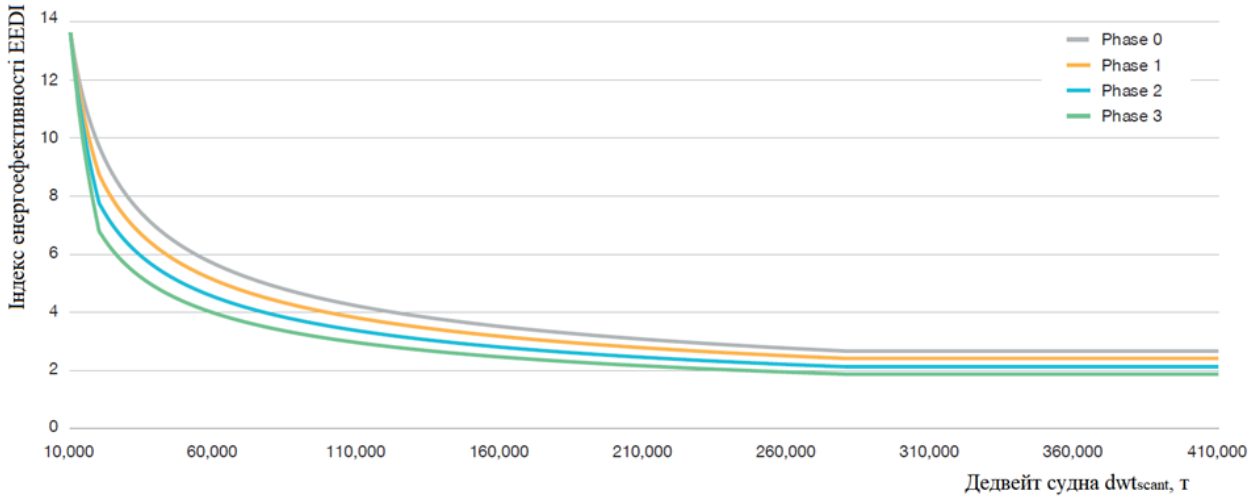



***Рисунок 1.*** *Вимоги до індексу енергоефективності EEDI балкерів [1]*

**Мінімальна потужність пропульсивного комплексу.** Хоча зниження встановленої потужності судна визнано методом отримання нижчого значення EEDI, воно також викликало занепокоєння тим, що це може призвести до недостатньої потужності суден зі зниженою маневреністю у важку погоду. В результаті цього IMO опублікувала метод оцінки для визначення мінімальної рушійної потужності, необхідної для підтримки безпечної маневреності суден у несприятливих умовах. Слід зазначити, що цей метод оцінки в даний час діє для фаз 0 та фази 1 EEDI. Очікується, що він також буде включений до фази 2 EEDI, яка буде діяти з 1 січня 2020 року.

Мінімальна необхідна потужність рушія може бути визначена за оцінкою рівня 1 або 2. Рівень оцінки 1 дозволяє розрахувати мінімальне значення потужності, необхідне на основі типу судна та дедвейту. Згідно вимог IMO для балкерів мінімальна пропульсивна потужність визначається за виразами [3]:

– для суден, дедвейт яких не перевищує 145 тис. т.

$$N = 0{,}0763 \cdot DW + 3374{,}3;$$

– для суден, дедвейт яких більше145 тис. т.

$$N = 0{,}0490 \cdot DW + 7329{,}0.$$

Для аналізу методу призначення показника SMCR із зменшеним значенням середнього ефективного тиску на величину SFOC було прийнято судно балкер «CSL Tarantau», номер IMO 9600982, що має дедвейт 71900 тон. В якості головного двигуна на балкері встановлений дизель виробництва MAN B&W моделі 5S65ME-C. Головний двигун має номінальну ефективну потужність 10430 кВт при частоті обертання колінчатого валу 81 хв$^{-1}$. Виробником судна було закладено додатково резерв потужності головного двигуна 800 кВт на реалізацію потреб валогенератору та запас на зміну технічного стану головного двигуна 670 кВт (6,4 %), то пропоноване нове значення режиму SMCR становить:

$$N_{ен} = N'_{ен} + N_{вг} + N_{д} = 8150 + 800 + 670 = 9620 \text{ кВт},$$

де $N'_{ен}$ – необхідна пропульсивна потужність головного двигуна для забезпечення швидкості судна 13,5 вузлів, $N'_{ен} = 8150$ кВт. Отримане значення потужності не виходить за межу мінімально допустимого його значення згідно рекомендацій IMO для даного типу суден 8860 кВт.

Враховуючи той факт, що головний двигун працює за швидкісною (гвинтовою) характеристикою, то оновлене значення встановленої (специфікаційної) частоти обертання складе:

$$v_{сн} = \sqrt[3]{\frac{N_{ен}}{k_{2н} \cdot c_3}} = \sqrt[3]{\frac{9620}{0{,}029 \cdot 145826{,}3}} = 78{,}8 \ хв^{-1},$$

де $k_{2н}$ – коефіцієнт моменту гребного гвинта на режимі SMCR;

$c_3$ – коефіцієнт, що для даного судна становить $c_3$ = 145826,3.

Обмежувальні та гвинтові характеристики для вибраного режиму навантаження представлено на рис. 2, з якого видно, що вибраний режим SMCR не менше мінімального значення середнього ефективного тиску.

Використання математичного апарату додатку [4] дозволило отримати розрахунки питомої витрати палива для обох варіантів налаштування головного двигуна судна (рис. 3). Отримані результати вказують на можливість підвищення економічності дизеля до 2,3 г/(кВт·год) в діапазоні потужностей до 7800 кВт.

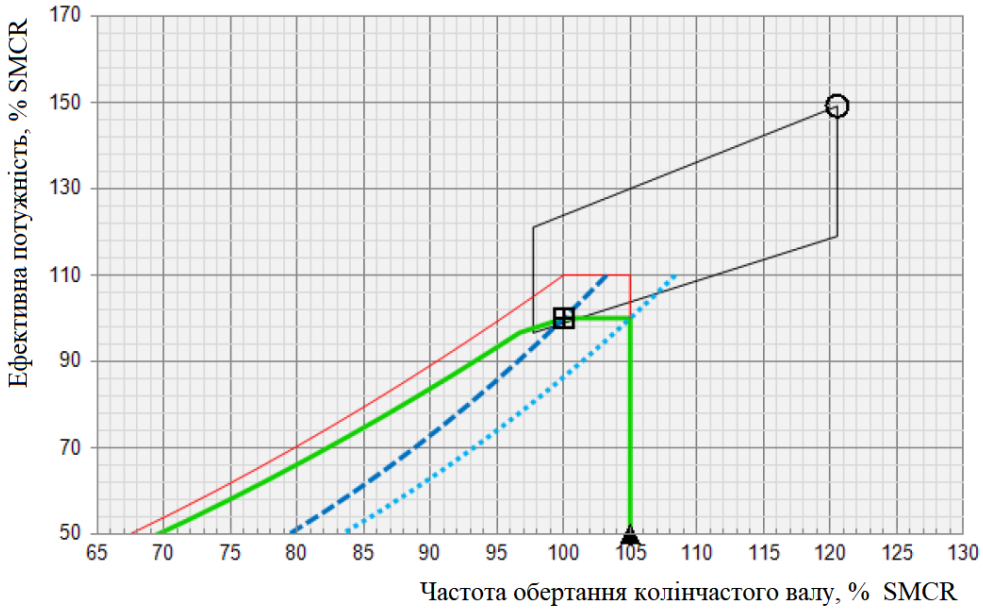



***Рисунок 2.*** *Обмежувальні та гвинтові характеристики головного двигуна: – обмежувальні характеристики для тривалого режиму навантаження; – обмежувальні характеристики для короткочасного режиму навантаження; – номінальна гвинтова характеристика; – характеристика «легкого» гвинта*

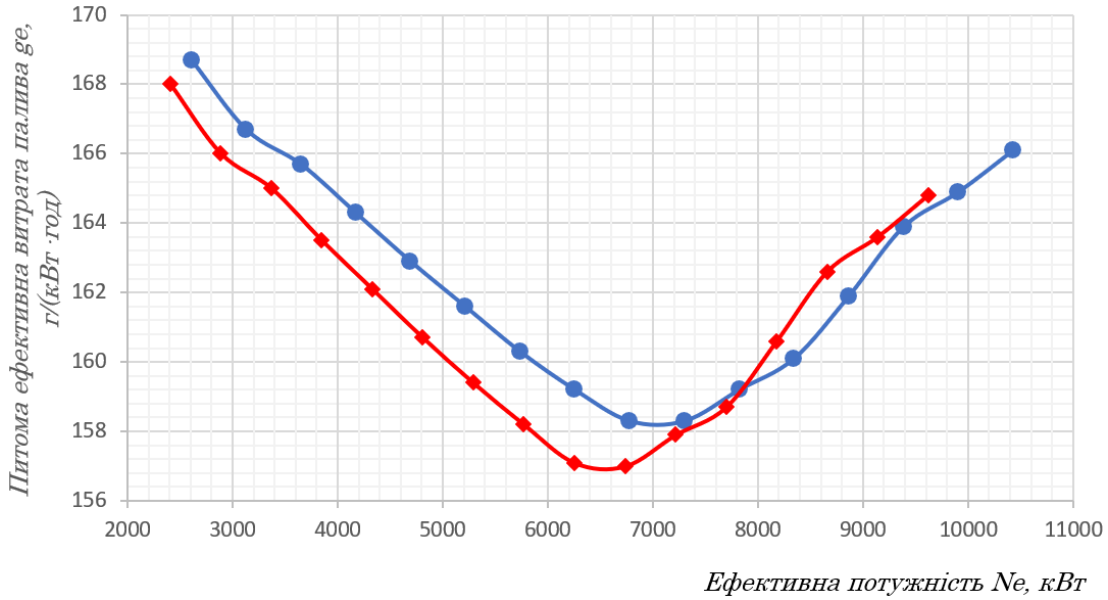



***Рисунок 3.*** *Залежність питомої витрати палива для базового та пропонованого варіантів налаштування головного двигуна: – базовий варіант; – варіант налаштування до часткових навантажень*

## Висновки

У роботі розглянуто методику оптимізації питомої витрати палива малообертовими двигунами суховантажних суден, що стає актуальним у контексті зростаючої уваги до енергоефективності та екологічної сталості у судноплавстві.

Розробка методів оптимізації використання палива та визначення потужності пропульсивних систем стає необхідною для забезпечення високої конкурентоспроможності та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище у сфері морського транспорту.

Дослідження показало можливість підвищення економічності дизельних двигунів у діапазоні навантажень до 7800 кВт, що є важливим кроком у напрямку створення більш ефективних та екологічно чистих морських транспортних засобів.

Оптимізація питомої витрати палива та визначення потужності пропульсивних систем є ключовими аспектами розвитку енергоефективного судноплавства, що відповідає сучасним екологічним та економічним вимогам у сфері морського транспорту.

## Література

[1]. Propulsion Trends in Bulk Carriers. Contributor, MAN Energy Solution, 2022, 28 p.

[2]. Annex 9. Resolution MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships.

[3]. 2013 Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions, as amended (Resolution MEPC.232(65), as amended by resolutions MEPC.255(67) and MEPC.262(68). IMO, 2015.

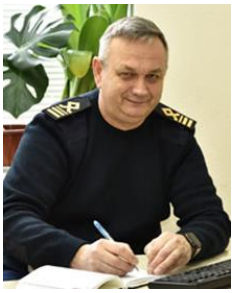
[4]. https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations

## Відомості про авторів

**Володимир Савчук,** к.т.н, доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, ORCID ID: 0000-0002-5266-850X.

**Дмитро Макарчук,** к.т.н., доцент кафедри, в.о. завідувача кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, ORCID ID: 0000-0002-4299-6614.

**Іван Пошивай**, аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



**Анатолій Дзигар**, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, ORCID ID: 0000-0001-5947-6263.