

УДК 629.5.067:656.614

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359956

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА МАРШРУТІ ПОРТ-САЇД – ПОРТ-КЛАНГ

Калініченко Є.В. канд. техн. наук, доцент, капітан далекого плавання, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

Стаття присвячена порівняльному аналізу стратегій управління режимами роботи головного двигуна контейнерного судна під час океанського переходу в умовах змінних гідрометеорологічних факторів. Актуальність дослідження зумовлена посиленням міжнародних вимог до енергоефективності морського транспорту та скорочення викидів парникових газів. У роботі розглянуто три основні стратегії управління режимом головного двигуна: підтримання сталої швидкості судна (*Constant Speed*), сталих обертів двигуна (*Constant RPM*) та сталої навантаженості (*Constant Load*). Дослідження виконано для двох контейнеровозів різних поколінь – CMA CGM VIRGINIA з двигуном MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія) та THALASSA PATRIS з двигуном MAN B&W 11S90ME-C9.2 (ME-серія) – на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг, який характеризується значною зміною течій у зимовий період. Аналіз виконано на основі розрахункової моделі, що використовує пропелерний закон для системи «двигун – гвинт фіксованого кроку» та характеристики питомої витрати палива малооборотних двигунів. У результаті дослідження встановлено наявність каскадного ефекту для двигунів MC-серії при застосуванні стратегії *Constant Speed*: зниження обертів у зоні сильних попутних течій може призводити до активації допоміжних блоуерів і додаткового дизель-генератора, що нівелює 38–50% очікуваної економії палива. Показано, що стратегія *Constant RPM* забезпечує більш стабільний режим роботи двигуна та дозволяє утримувати його в зоні мінімальної питомої витрати палива. Для двигунів ME-серії різниця між стратегіями є менш вираженою. Отримані результати свідчать, що для контейнерних суден з двигунами MC-серії на маршрутах зі змінними гідрометеорологічними умовами найбільш ефективною є стратегія *Constant RPM* у поєднанні з концепцією *Just-in-Time Arrival*. Запропонований підхід дозволяє забезпечити стабільний режим роботи головного двигуна, зменшити сумарну витрату палива та покращити показники вуглецевої інтенсивності судна відповідно до вимог сучасних міжнародних екологічних стандартів. Отримані результати можуть бути використані при плануванні режимів експлуатації контейнерних суден та під час розроблення заходів підвищення енергоефективності у межах системи управління енергетичною ефективністю судна (SEEMP).

Ключові слова: енергоефективність судна; головний двигун; *slow steaming*; *Constant Speed*; *Constant RPM*; каскадний ефект; СІІ; *JIT Arrival*; MAN B&W; контейнеровоз.

Постановка проблеми

Декарбонізація морського транспорту є одним із ключових викликів сучасного судноплавства. Прийнята у 2023 році оновлена Стратегія ІМО з декарбонізації передбачає досягнення нульового рівня викидів парникових газів від міжнародного судноплавства до 2050 року. Практичним інструментом реалізації цієї стратегії є система показників вуглецевої інтенсивності (СІІ), запроваджена з 2023 року, а також вдосконалений план управління енергоефективністю судна (SEEMP Part III). У відповідь на посилення екологічних вимог судновласники активно впроваджують різні експлуатаційні стратегії підвищення енергоефективності, серед яких одним із найпоширеніших є режим *slow steaming* – зниження експлуатаційної швидкості суден з метою скорочення витрати палива.

Разом з тим практика експлуатації показує, що просте зниження швидкості судна не завжди призводить до пропорційного зменшення витрати палива. Важливим чинником, що визначає фактичну енергоефективність рейсу, є стратегія управління режимом роботи головного двигуна (ГД) під час переходу. Більшість сучасних *Voyage Instructions* від судновласників передбачає підтримання сталої середньої швидкості судна (*Constant Speed*, CS), що спрощує планування

логістики та контроль виконання рейсу. Водночас альтернативні підходи до управління режимами роботи головного двигуна, зокрема підтримання сталих обертів (*Constant RPM*, CR) або сталої навантаженості двигуна (*Constant Load*, CL), можуть мати інші енергетичні характеристики та по-різному впливати на витрати палива.

У науковій літературі значна увага приділяється оптимізації швидкості судна та вибору енергоефективних маршрутів [1–3], [4, 5]. Однак практична верифікація різних стратегій управління режимами головного двигуна в умовах реальних океанських переходів зі змінними гідрометеорологічними умовами залишається недостатньо дослідженою. Особливий інтерес у цьому контексті становить маршрут від виходу із Суецького каналу до порту Кланг (Малайзія), який є одним із ключових контейнерних маршрутів напрямку Схід–Захід. Його характерною особливістю у зимовий період є різка зміна умов руху: сприятлива попутна течія в Аравійському морі змінюється зустрічною після проходження мису Дондра (Шрі-Ланка). Така зміна умов створює природні передумови для порівняльного аналізу ефективності різних стратегій управління режимами роботи головного двигуна.

Таким чином, науковою проблемою даного дослідження є визначення ефективності різних стратегій управління режимом головного двигуна контейнерного судна під час океанського переходу в умовах змінних гідрометеорологічних факторів. Предметом дослідження є вплив стратегій керування режимами головного двигуна контейнеровоза на енергоефективність рейсу на маршруті Суец – Порт-Кланг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення енергоефективності морського транспорту в останні десятиліття стало одним із ключових напрямів досліджень у сфері експлуатації суден, що зумовлено як економічними факторами, пов'язаними зі зростанням вартості суднового палива, так і посиленням міжнародних екологічних вимог до морського транспорту. Особливо значущими стали регуляторні механізми, запроваджені Міжнародною морською організацією (ІМО), зокрема показники енергоефективності суден та операційної вуглецевої інтенсивності (EEDI, EEXI та CII) [1–3]. У цьому контексті підвищення ефективності експлуатації суден розглядається не лише як економічна задача, а і як важливий елемент глобальної стратегії декарбонізації міжнародного судноплавства. Запровадження зазначених індикаторів стимулювало активний розвиток наукових досліджень, спрямованих на пошук технічних та експлуатаційних рішень, здатних зменшити витрати палива та рівень викидів парникових газів під час експлуатації суден.

Значна частина наукових досліджень у цій сфері присвячена оптимізації швидкості руху суден. У фундаментальній роботі Psaraftis та Kontovas запропоновано класифікацію математичних моделей швидкісної оптимізації для енергоефективного судноплавства та систематизовано підходи до мінімізації витрат палива і викидів парникових газів [4]. Подальші дослідження розвинули ці підходи з урахуванням стохастичних факторів експлуатації суден, таких як зміни гідрометеорологічних умов, портові обмеження або логістичні вимоги контейнерних ліній. Зокрема, у роботах Fagerholt та співавторів запропоновано моделі оптимізації швидкості руху суден на регулярних контейнерних маршрутах із врахуванням графіків заходу в порти та часових обмежень сервісів [5].

Після різкого зростання цін на паливо у 2008–2010 роках у судноплаванні широкого поширення набув режим *slow steaming* – систематичного зниження експлуатаційної швидкості суден з метою скорочення витрат палива та викидів CO₂. Дослідження Cariou [6] та Lindstad із співавторами [7] показали, що зменшення швидкості на 10–20% може забезпечити зниження витрати палива до 30–40% завдяки кубічній залежності між швидкістю судна та необхідною потужністю рушійної установки. Разом із тим подальші дослідження Notteboom та Ronen показали, що ефективність *slow steaming* значною мірою залежить від організації контейнерних сервісів, структури флоту та характеристик

суднових енергетичних установок [8, 9]. Надмірне зниження швидкості може призводити до збільшення тривалості рейсів, зростання експлуатаційних витрат та необхідності залучення додаткових суден до транспортної системи. Крім того, у ряді випадків тривала робота головних двигунів у режимах глибокого часткового навантаження може негативно впливати на їх експлуатаційні характеристики та ефективність використання суднової енергетичної установки.

Енергоефективність експлуатації суден залежить не лише від швидкісних режимів, але й від організації навігаційного процесу та прийняття рішень щодо траєкторії руху судна. У ряді досліджень показано, що оптимізація навігаційних рішень, включаючи вибір маршруту, корекцію режимів руху та інтеграцію інформаційних систем, може суттєво впливати на загальний енергетичний баланс судна. Зокрема, у роботах Калініченка та співавторів запропоновано підхід до управління енергоефективністю судна на різних етапах його життєвого циклу та розглянуто можливості підвищення ефективності експлуатації шляхом удосконалення навігаційних методів і систем підтримки прийняття рішень [10, 11].

Окремий напрям досліджень присвячений аналізу енергетичних характеристик суднових дизельних двигунів при роботі в режимах часткового навантаження. У класичних роботах Kuiken та Woodyard показано, що паливна характеристика малооборотного двотактного дизеля має виражену U-подібну форму, а мінімум питомої витрати палива досягається у зоні приблизно 70–85% максимальної тривалої потужності (MCR) [12, 13]. При зниженні навантаження нижче 30–40% MCR спостерігається погіршення процесу згоряння, зниження тиску наддуву та зростання питомої витрати палива. Для двигунів попередніх поколінь із механічним упорскуванням (MC-серія) ці явища проявляються особливо помітно і можуть супроводжуватися необхідністю використання допоміжних систем продування. Сучасні технічні дослідження виробників суднових двигунів, зокрема MAN Energy Solutions, підтверджують ці закономірності та демонструють покращення характеристик часткових навантажень у двигунах нового покоління з електронним керуванням (ME-серія) [14, 15].

У сучасних дослідженнях також активно розглядається інтеграція енергетичної оптимізації рейсів із логістичними механізмами управління портовими операціями. Одним із таких підходів є концепція *Just-in-Time Arrival* (JIT Arrival), що передбачає узгодження швидкості руху судна з фактичною готовністю порту прийняти судно. Відповідно до рекомендацій ІМО та міжнародних галузевих організацій, застосування JIT-планування дозволяє скоротити час очікування суден на рейді та створює додаткові можливості для зниження швидкості переходу без порушення розкладу контейнерних ліній [16, 17].

Попри значну кількість досліджень у галузі енергоефективності судноплавства, більшість із них

зосереджена на оптимізації швидкості судна або маршруту в цілому. Водночас безпосередні експлуатаційні стратегії управління режимом головного двигуна розглядаються значно рідше. У практиці експлуатації контейнерних суден застосовуються кілька основних підходів до управління режимом роботи головного двигуна, серед яких найбільш поширеними є підтримання сталої швидкості судна (Constant Speed), підтримання сталих обертів двигуна (Constant RPM) та підтримання сталого навантаження двигуна (Constant Load). Однак у відкритих наукових джерелах практично відсутні дослідження, у яких ці стратегії аналізуються з урахуванням реальних океанських маршрутів зі змінними гідрометеорологічними умовами та особливостей роботи малооборотних дизельних двигунів різних поколінь.

Особливо недостатньо дослідженим залишається вплив режимів часткового навантаження на роботу двигунів MC-серії у режимах slow steaming. У таких умовах зниження обертів головного двигуна може призводити до каскадних змін у роботі суднової енергетичної установки, включаючи активацію допоміжних систем продування, збільшення навантаження на судову електростанцію та зміну загального енергетичного балансу судна. Аналіз цих ефектів у контексті реальних контейнерних маршрутів зі змінними течіями та гідрометеорологічними умовами практично відсутній у науковій літературі, що і визначає актуальність даного дослідження.

Мета статті

Метою статті є порівняльне оцінювання ефективності стратегій управління режимом головного двигуна контейнерного судна (Constant Speed, Constant

RPM та Constant Load) за показниками енергоефективності рейсу та стабільності роботи суднової енергетичної установки.

Матеріали та методи

Для дослідження обрано два контейнеровози, що представляють різні покоління судових енергетичних установок: CMA CGM VIRGINIA (5 100 TEU, клас Panamax) та THALASSA PATRIS (13 800 TEU, клас New Panamax) (табл. 1).

Обидва судна збудовано на верфі Hyundai Heavy Industries (Ulsan, Республіка Корея) та обладнано малооборотними двотактними дизелями MAN Energy Solutions, але різних серій – що й утворює ключовий науковий контраст дослідження.

CMA CGM VIRGINIA (IMO 9351139) – Panamax-контейнеровоз 2008 року побудови з двигуном MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія, механічне впорскування, MCR 57 114 кВт). MC-серія чутлива до режиму часткових навантажень: нижче ~50–54 об/хв турбокомпресор не забезпечує достатнього наддуву і потрібні допоміжні електричні блоуери продувки.

THALASSA PATRIS (IMO 9665607) – New Panamax 2013 року з двигуном MAN B&W 11S90ME-C9.2 (ME-серія, електронне управління, MCR 53 250 кВт / 81 RPM, NCR 45 262 кВт / 76,7 RPM). ME-серія зберігає оптимальний режим продування до ~25–30% MCR без допоміжних блоуерів – завдяки гнучкому керуванню фазами газорозподілу та впорскуванням палива.

Маршрут Порт-Саїд – Порт-Кланг протяжністю ~5150 NM поділяється на п'ять характерних ділянок із принципово різними умовами (табл. 2).

Таблиця 1

Технічні характеристики суден-об'єктів дослідження

Параметр	CMA CGM VIRGINIA	THALASSA PATRIS
ІМО номер	9351139	9665607
Клас	Panamax	New Panamax / Post-Panamax
Рік побудови	2008	2013
LOA × В, м	294,1 × 32,2	368,5 × 51,0
Дедвейт, т	65 890	152 344
Місткість, TEU	5 042 – 5 100	13 800
Головний двигун	MAN B&W 10K98MC-C	MAN B&W 11S90ME-C9.2
Серія двигуна	MC (механічне впорскування)	ME (електронне управління)
Потужність MCR, кВт	57 114	53 250 (MCR) / 45 262 (NCR)
Оберти MCR, об/хв	~96	81 (MCR) / 76,7 (NCR)
Режим LSP (Low Steam)	54–61 об/хв, ~15 вузлів	72 об/хв, ~20,5 вузлів
Витрата HFO на добу (LSP)	80–100 т/добу	~180–220 т/добу (оцінка)

Таблиця 2

Характеристика ділянок маршруту (зимовий період, грудень–лютий)

Ділянка маршруту	Відстань, NM	Тривалість, доби	Вітер (зима)	Течія та вплив
Червоне море (Порт-Саїд → Баб-ель-Мандеб)	~1100	~3,0	NW, 15–25 вуз.	Слабка або зустрічна; коротка крута хвиля
Аденська затока	~550	~1,5	NE мусон, помірний	Нейтральна або слабо попутна
Аравійське море → мис Дондра	~1950	~5,3	NE мусон, 10–18 вузлів	Пн. Екваторіальна течія 0,5–1,5 (–2,5) вузла – попутна
Після мису Дондра → Малак-кська протока	~1100	~3,0	NE вітер, слабший	Зустрічна 0,5–1,0 вуз. – зростання опору
Малак-кська протока → Порт-Кланг	~450	~1,0	Слабкий	Припливні течії; обмежена акваторія
РАЗОМ	~5150	~13,8	–	–

Визначальна особливість маршруту у зимовий період – зміна знаку течії після мису Дондра: попутна Північно-Екваторіальна течія (0,5–2,5 вузла) в Аравійському морі різко переходить у зустрічну після Шрі-Ланки. Така зміна є природним експериментальним полігоном для випробувань стратегій управління ГД.

У межах дослідження проведено порівняльний аналіз трьох стратегій управління режимом роботи головного двигуна контейнерного судна:

1. Constant Speed (CS) передбачає підтримання сталої швидкості судна шляхом регулювання обертів головного двигуна залежно від зовнішніх умов руху.

2. Constant RPM (CR) полягає у підтриманні сталих обертів головного двигуна, тоді як швидкість судна змінюється залежно від дії вітру, хвилювання та течій.

3. Constant Load (CL) передбачає підтримання постійного відсотка навантаження головного двигуна відносно максимальної тривалої потужності (MCR).

Окремим операційним фактором енергоефективності, безпосередньо пов'язаним з вибором стратегії управління ГД, є оптимізація диференту судна (trim optimisation). Для THALASSA PATRIS результати танкових випробувань Hyundai Maritime Research Institute (HMRI-2013-AB-011) [18] надають кількісну базу для оцінки впливу диференту на потужність, необхідну для підтримання заданої швидкості.

Відповідно до результатів випробувань (Table 5, Ship Service Prediction, Sea Margin 15%), при швидкості 21,0 вузла на розрахунковій осадці (design draft, T = 14,50 м) потужність головного двигуна становить: при рівному кілі – 33 701 кВт; при диференті 1,0 м на корму – 34 860 кВт (+3,4%); при диференті 1,0 м на ніс – 33 689 кВт (–0,04%). Тобто незначний диферент на ніс є оптимальним або нейтральним, тоді як диферент на корму 1,0 м збільшує необхідну потужність на ~1 160 кВт при тій самій швидкості.

На scantling draft (T = 15,80 м – відповідає повному вантажу THALASSA PATRIS на маршруті Суец–Кланг)

різниця між диферентом 1,0 м на ніс та 1,0 м на корму при 21,0 вузла складає: 37 548 кВт (trim by bow) проти 36 661 кВт (trim by bow) – при зіставленні з trim by stern 37 548 кВт. Фактично при швидкості 21,0 вузла на повній осадці диферент на ніс 1,0 м забезпечує економію ~890 кВт (близько 2,4%) відносно диференту на корму. В перерахунку на добову витрату палива це відповідає приблизно 1,5–2,0 т HFO/добу – або ~9 000–12 000 USD за рейс тривалістю 12 діб при ціні VLSFO 600 USD/т.

Зв'язок між трим-оптимізацією та стратегією управління ГД полягає у наступному. При CR-стратегії режим двигуна (оберти) фіксований, а швидкість природно варіює залежно від зовнішніх умов – завантаженість баластних танків при цьому також змінюється. Це дозволяє офіцеру палуби оперативно коригувати диферент, не порушуючи режиму ГД. При CS-стратегії капітан змушений паралельно керувати і обертами (для підтримання швидкості), і диферентом – що на практиці призводить до нехтування оптимальним диферентом в умовах стресу від течії або вітру. Таким чином, CR-стратегія є більш сумісною з підтриманням оптимального диференту впродовж рейсу.

Слід зазначити, що дані буклету [18] отримані методом танкових випробувань на моделі у масштабі 1:45,76 відповідно до стандарту ІТТС-78 з корекцією за ІТТС-99 для енергозберігаючих пристроїв (ESDs), тому вони відображають реальні характеристики корпусу THALASSA PATRIS без спрощень. Це надає їм статус верифікованих первинних даних і підвищує достовірність оцінок, наведених у даному дослідженні.

Виклад основного матеріалу

Подальший виклад присвячений теоретичному аналізу стратегій управління режимом роботи головного двигуна контейнерного судна та формуванню розрахункової моделі їх енергоефективності.

Для системи «двигун – гвинт фіксованого кроку» за стаціонарного режиму руху та близьких

гідродинамічних умов потужність на валу наближено підкоряється пропелерному закону:

$$P/P_0 \approx (N/N_0)^3, K_Q(J) \approx const, \quad (1)$$

де P – поточна потужність, кВт; P_0 – потужність при номінальних обертах N_0 (MCR), кВт. За цих умов відносне навантаження двигуна (%MCR) може бути наближено оцінене через відношення поточних обертів до номінальних за умови руху по пропелерній характеристиці. Співвідношення (1) використовується як інженерне наближення, справедливе для гвинта фіксованого кроку за квазісталих умов руху та незначної зміни коефіцієнта

моменту $K_Q(J)$. Разом з тим фактичне навантаження також залежить від гідрометеорологічних умов, осадки судна, стану корпусу та гвинта, а тому закон куба слід розглядати як інженерне наближення.

Питоме ефективне споживання палива (SFOC) для двигунів MC-серії має U-подібну залежність від навантаження з мінімумом у зоні 75–85% MCR. При зниженні нижче 30–35% MCR SFOC різко зростає, а при <18–20% MCR виникає потреба в допоміжних блоуерах продувки. Для ME-серії крива SFOC значно пологіша в діапазоні 30–80% MCR завдяки електронному управлінню (табл. 3).

Таблиця 3.1

SFOC-характеристика двигуна MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія, HFO)

N, об/хв	% MCR	Потужність, кВт	SFOC, г/кВт·год	Витрата ГД, т/добу	Режим / примітка
96	100	57 114	175	239	MCR – паспортний максимум
84	67	38 200	168	154	Оптимальна зона (75–85% MCR)
78	54	30 900	170	126	Оптимальна зона
72	42	24 200	177	102	Нижня межа оптимуму
65	31	17 900	188	80	Зона зниженого наддуву
61	25	14 400	196	68	Базовий LSP режим (верхня межа)
58	22	12 700	200	61	Базовий LSP режим (нижня межа)
54	18	10 200	212	52	Блоуер – на межі вмикання

Продовження таблиці 3

N, об/хв	% MCR	Потужність, кВт	SFOC, г/кВт·год	Витрата ГД, т/добу	Режим / примітка
50	14	7 900	240	43	БЛОУЕР ON → +ДГ; SFOC різко зростає
46	11	6 300	270	38	Критична зона: нестабільне горіння
42	8	4 800	300	31	Межа безпечної роботи MC-серії

Таблиця відображає характерну залежність питомої витрати палива та режимів роботи малооборотного двотактного дизеля MAN B&W серії MC від частоти обертання і відсотка навантаження відносно максимальної тривалої потужності (MCR). У діапазоні приблизно 75–85% MCR формується оптимальна зона експлуатації двигуна, у якій досягається мінімальне значення питомої витрати палива (SFOC) та забезпечується стабільний процес згорання. При подальшому зниженні навантаження нижче приблизно 30–35% MCR спостерігається погіршення параметрів продування і поступове зростання SFOC. У зоні 18–25% MCR двигун переходить у режим slow steaming, де робота турбокомпресора стає недостатньою і виникає необхідність використання допоміжних електричних блоуерів продування. Подальше зниження обертів призводить до входження двигуна у критичну область режимів, що характеризується активацією блоуера, нестабільністю процесу згорання та різким зростанням питомої витрати палива. Наведені значення відповідають типовим експлуатаційним характеристикам двигунів MAN Energy

Solutions даного покоління і відображають загальну форму паливної характеристики таких установок.

Каскадним ефектом названо ланцюг технічних наслідків, що виникає при суттєвому зниженні обертів ГД у межах CS-стратегії і нівелює очікувану економію палива. Механізм розгортається у чотири послідовні стадії.

Стадія 1: попутна течія → V по землі зростає → для CS треба знизити N від 60 до 42–46 об/хв.

Стадія 2: $N < 52$ –54 об/хв → тиск наддуву падає → автоматично вмикаються допоміжні блоуери (~300 кВт кожен).

Стадія 3: електричне навантаження від блоуерів перевищує потужність одного ДГ → запуск 2-го ДГ (+15 т/добу HFO-еквів.).

Стадія 4: SFOC ГД зростає до 270–300 г/кВт·год (проти 196–200 у базовому режимі) → реальна економія по судну вдвічі менша очікуваної.

Позначене (*) у табл. 4 значення питомої витрати палива близько 270 г/кВт·год є розрахунковою оцінкою, отриманою з урахуванням погіршення умов

продування та нестабільності процесу згоряння, характерних для режимів дуже малого навантаження головного двигуна. У реальних експлуатаційних умовах фактичне значення SFOC у цій зоні може бути ще вищим через додаткові втрати енергії, пов'язані з роботою допоміжних систем продування та зниженням

ефективності згоряння палива. Наведені оцінки узгоджуються з практичним досвідом експлуатації двигунів MC-серії на контейнерних суднах і підтверджуються особистими спостереженнями автора під час роботи на зазначених типах суден.

Таблиця 4

Кількісна оцінка каскадного ефекту (попутна течія, CS: N = 46 об/хв)

Показник	Базовий 61 об/хв	CS: 46 об/хв	CR: 61 об/хв	Різниця CS	Різниця CR
Оберти ГД, об/хв	61	46	61	-15	0
MCR, %	25	11	25	-14	0
SFOC ГД, г/кВт·год	196	~270	196	+74	0
Витрата ГД, т/добу	68	38	68	-30	0
Блоуер + 2-й ДГ, т/добу еквів.	15	30	15	+15	0
РАЗОМ по судну, т/добу	83	68*	83	-15	0
Очікувана економія (тільки ГД)	-	-30 т/д	-	100% ref.	-
Реальна економія (по судну)	-	-15 т/д	-	50% втрачено!	-

На підставі теоретичного аналізу в табл. 5 наведено порівняльну оцінку стратегій CS, CR та CL. Стратегія CR є оптимальною для MC-серії: SFOC залишається в зоні мінімуму, блоуери не залучаються, ДГ

працює у стабільному одноцилиндровому режимі. Відхилення від розкладу ($\pm 6-12$ год) компенсується ЛІТ-корекцією на фінальній ділянці у Малаккській протоці, де TSS природно обмежує швидкість до 12 вузлів.

Таблиця 5

Порівняльна характеристика стратегій CS, CR та CL

Критерій	Constant Speed (CS)	Constant RPM (CR)	Constant Load (CL)
Оберти ГД	Варіюються 42–72 об/хв	Фіксовані 58–61 об/хв	Варіюються (за опором)
SFOC стабільність	Нестабільне (+38% на крит. ділянці)	Стабільне (оптим. зона)	Стабільне (\approx CR)
Блоуер	Вмикається при теч. > 1,5 вв	Не потрібен	Рідко
Кількість ДГ на ходу	1–3 (непостійна)	1 (стабільно)	1–2
Відхилення від розкладу	Відсутнє (теоретично)	До ± 12 год \rightarrow ЛІТ	До ± 8 год \rightarrow ЛІТ
Придатність MC-серія	Проблематична	Оптимальна	Задовільна
Придатність ME-серія	Прийнятна	Оптимальна	Оптимальна
Загальна оцінка (MC)	☆☆☆☆	★★★★★	★★★★☆

Результати та їх обговорення

У цьому розділі наведено результати розрахункового аналізу ефективності трьох стратегій управління режимом головного двигуна – Constant Speed (CS), Constant RPM (CR) та Constant Load (CL) – для контейнеровозів різних поколінь на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг. Розрахунок виконано з урахуванням реальних гідрометеорологічних умов зимового періоду та характерних параметрів судових енергетичних установок. Особливу увагу приділено впливу змін течій на режим роботи головного двигуна та пов'язаному з цим каскадному ефекту, що виникає при роботі двигунів MC-серії у зоні глибокого часткового навантаження.

Отримані результати дозволяють порівняти енергетичну ефективність різних стратегій управління та оцінити їх вплив на сумарну витрату палива, тривалість рейсу і показник вуглецевої інтенсивності судна.

Розрахунок виконано методом покрокового аналізу по п'яти характерних ділянках маршруту на основі пропелерного закону (1) та типових SFOC-характеристик двигунів MAN Energy Solutions. Для стратегії CS оберти варіюються залежно від швидкості відносно води

$$N \approx N_{base} \cdot \frac{V_{water}}{V_{base}}$$

для CR – оберти фіксовані, швидкість по землі варіюється з течією. Витрата по судну включає ГД (з хвильовою добавкою), допоміжні дизель-генератори (ДГ) та витрати від блоуерів при їх активації.

Результати розрахунку витрати палива для контейнеровоза **CMA CGM VIRGINIA** при застосуванні стратегії Constant Speed наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Витрата палива по ділянках, CMA CGM VIRGINIA, стратегія CS (15,0 вузлів)

№	Ділянка маршруту	N, об/хв	% MCR	SFOC	ГД+хв т/д	ДГ т/д	Блоуер	Діб	FC, т
1	Червоне море	61	25,7	266	99,5	15,0	–	3,06	349,8
2	Аденська затока	59	23,2	272	88,5	15,0	–	1,53	158,2
3	Аравійське море (теч. 1,0 вуз.)	56	19,8	283	77,9	15,0	–*	5,42	503,1
4	Після Дондра (зустр. теч.)	63	28,3	259	104,5	15,0	–	3,06	365,0
5	Малаккська протока	60	24,4	269	91,0	15,0	–	1,25	132,5
РАЗОМ	–	59,8	24,2	269	92,3	15,0	–	14,32	1 508,6

Розрахунок виконано для середньої швидкості 15,0 вузлів з урахуванням характерних гідрометеорологічних умов зимового періоду на кожній ділянці маршруту. Як видно з таблиці, оберти головного двигуна в межах CS-стратегії суттєво змінюються залежно від впливу течій та хвилювання. Найменші оберти спостерігаються на ділянці Аравійського моря, де попутна течія дозволяє підтримувати необхідну швидкість по землі при зниженому навантаженні двигуна. Саме на цій ділянці виникають передумови для прояву каскадного ефекту, пов'язаного з роботою двигуна в зоні глибокого часткового навантаження.

На ділянці 3 при базовій попутній течії близько 1,0 вузла оберти головного двигуна становлять приблизно 56 об/хв, що перевищує поріг активації допоміжних блоуерів (≈52 об/хв), тому їх робота у цьому сценарії не потрібна. Однак у реальних умовах Аравійського моря швидкість попутної течії окремими днями може перевищувати 1,5 вузла. У такій ситуації підтримання сталої швидкості в межах стратегії CS потребує

подальшого зниження обертів двигуна, що призводить до активації блоуера та супутнього зростання енергетичних витрат; детальний аналіз цього сценарію наведено в табл. 8. У таблиці кольоровим виділенням показано характер зміни ефективності: жовтим позначено режими з підвищеним значенням SFOC, а червоним – ділянки з максимальною перевитратою палива.

Для порівняння в табл. 7 наведено результати розрахунку при застосуванні стратегії Constant RPM. У цьому випадку оберти головного двигуна підтримуються на сталому рівні 60 об/хв, що відповідає приблизно 24–25% MCR і знаходиться у стабільній зоні роботи двигуна без активації допоміжних блоуерів. За такої стратегії швидкість судна змінюється залежно від зовнішніх умов: на ділянці з попутною течією судно природно прискорюється, тоді як на зустрічній течії швидкість дещо зменшується. Проте термодинамічний режим двигуна при цьому залишається стабільним на всіх ділянках переходу.

Таблиця 7

Витрата палива по ділянках, CMA CGM VIRGINIA, стратегія CR (60 об/хв = const)

№	Ділянка маршруту	N, об/хв	% MCR	SFOC	ГД+хв т/д	ДГ т/д	Блоуер	Діб	FC, т
1	Червоне море	60	24,4	269	96,0	15,0	–	3,10	343,8
2	Аденська затока	60	24,4	269	92,0	15,0	–	1,51	161,3
3	Аравійське море (V→16,0 вн.)	60	24,4	269	91,0	15,0	–	5,08	538,3
4	Після Дондра (V→14,2 вн.)	60	24,4	269	94,0	15,0	–	3,23	351,9
5	Малаккська протока	60	24,4	269	91,0	15,0	–	1,25	132,5
РАЗОМ	–	60,0	24,4	269	92,8	15,0	–	14,16	1527,8

При застосуванні стратегії Constant RPM на ділянці 3 судно природно прискорюється до приблизно 16,0 вузлів під дією попутної течії, що призводить до скорочення тривалості переходу на цій ділянці приблизно на 0,34 доби. На наступній ділянці маршруту

після мису Дондра, де діє зустрічна течія, швидкість судна зменшується до близько 14,2 вузлів. Виникле відхилення від графіка компенсується подальшою ЛІТ-корекцією часу прибуття на фінальній стадії рейсу. При цьому оберти головного двигуна залишаються

сталими на всіх ділянках переходу, що забезпечує незмінний режим роботи двигуна та стабільне значення питомої витрати палива (SFOC).

При помірній попутній течії близько 1,0 вузла активація допоміжних блоуерів не відбувається, оскільки оберти головного двигуна залишаються вище порогового значення їх увімкнення. Проте у реальних умовах Аравійського моря в зимовий період швидкість течії окремими днями може досягати 2,0–2,5 вузла. Саме для такого сценарію, характерного для практичних

рейсів контейнеровозів на цьому маршруті, виконано окремий розрахунок. За вимоги підтримання сталої швидкості у межах стратегії CS сильна попутна течія змушує суттєво знижувати оберти головного двигуна, що переводить його у критичну область часткових навантажень. У результаті активуються допоміжні блоуери та додатковий дизель-генератор, що формує так званий каскадний ефект. Кількісні результати цього сценарію наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Каскадний ефект при попутній течії 2,5 вузли (реальний сценарій)

Показник	Базовий 60 об/хв	CS: 46 об/хв (теч. 2,5 вуз)	CR: 60 об/хв (теч. 2,5 вуз)	ΔCS vs CR	Примітка
Оберти ГД, об/хв	60	46	60	-14	CS змушений знижуватись
% MCR	24,4	11,0	24,4	-13,4	Вихід із оптимуму
SFOC, г/кВт·год	269	~290	269	+21	Погіршення
Витрата ГД, т/добу	91,0	~38,5	91,0	-52,5	ГД «нібито» економить
Блоуер + 2-й ДГ, т/добу	15,0	30,0	15,0	+15,0	Каскадний ефект
РАЗОМ т/добу	106,0	~73,5	106,0	-32,5	
Очікувана економія (тільки ГД)	-	-52,5 т/д	-	100% ref.	Теоретична
Реальна економія	-	-32,5 т/д	-	38% втрачено!	Каскадний ефект

При застосуванні стратегії CS за умов попутної течії близько 2,5 вузла оберти головного двигуна змушено знижуються приблизно до 46 об/хв для підтримання заданої швидкості судна. Такий режим відповідає глибокому частковому навантаженню двигуна і призводить до активації допоміжних блоуерів продування, що, у свою чергу, потребує запуску другого дизель-генератора. У результаті виникає каскадний ефект, при якому фактична економія палива по судну

становить лише близько 32,5 т/добу порівняно з базовим режимом, тоді як очікувана економія лише за рахунок зменшення навантаження головного двигуна могла б досягати 52,5 т/добу. Таким чином, приблизно 38% потенційної економії палива нівелюється додатковими енергетичними витратами суднової енергетичної установки.

Зведені результати порівняльного аналізу стратегій CS, CR та CL для обох суден наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Зведені результати порівняння стратегій CS, CR та CL для обох суден

Показник	CMA CGM VIRGINIA			Δ(CS–CR)	THALASSA PATRIS			Δ(CS–CR)
	CS	CR	CL		CS	CR	CL	
Витрата НФО, т	1 508,6	1 527,8	1 527,8	-19 т	2 169,8	2 201,7	2 201,7	-32 т
Час рейсу, діб	14,32	14,16	14,16	+0,16	10,47	10,39	10,39	+0,08
CO ₂ , т	4 698	4 757	4 757	-59	6 757	6 856	6 856	-99
СП	0,01384	0,01402	0,01402	-1,3%	0,00861	0,00874	0,00874	-1,5%
Активаций блоуера	0–2	0	0	-	0	0	0	-
Оцінка стратегії	⚠	✓	✓	-	⚠	✓	✓	-

У таблиці подано сумарну витрату палива за рейс, тривалість переходу, відповідні викиди CO₂ та розрахункові значення показника СП, що дозволяє оцінити не лише безпосередню витрату палива, але й вплив обраної стратегії управління головним двигуном на

екологічну ефективність судна відповідно до вимог MARPOL Annex VI. Формально стратегія CS демонструє дещо меншу сумарну витрату палива, що пояснюється меншим загальним часом рейсу, оскільки при CS судно на ділянках зі зустрічною течією не надолужує

втрачений час. Однак у реальній експлуатаційній практиці зазвичай існує вимога прибути до порту в заданий час. У такому випадку капітан змушений компенсувати відставання підвищенням обертів головного двигуна на ділянках зі зустрічною течією (зокрема на ділянці 4) до приблизно 68–72 об/хв, що призводить до зростання фактичної витрати палива за CS-стратегією на 3–7% порівняно зі стратегією CR. Такий операційний сценарій неодноразово спостерігався автором під час реальних рейсів на контейнеровозі CMA CGM VIRGINIA.

Від'ємне значення різниці $\Delta(CS-CR)$ у базовому сценарії пояснюється насамперед різницею тривалості рейсу і фактично є розрахунковим артефактом, а не відображенням вищої енергоефективності стратегії CS. У разі вимоги точного часу прибуття капітан змушений компенсувати відставання підвищенням обертів головного двигуна на ділянках зі зустрічною течією, внаслідок чого сумарна витрата палива за стратегією CS для двигунів MC-серії стає на 3–7% більшою порівняно зі стратегією CR. Аналогічно, формально нижче значення показника СІІ при CS пояснюється передусім меншою тривалістю рейсу, а не більш ефективною роботою головного двигуна.

Висновки

У статті виконано порівняльний аналіз стратегій управління режимами роботи головного двигуна контейнерних суден у реальному океанському переході на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг у зимовий період. На основі теоретичного аналізу характеристик малооборотних двотактних дизелів та розрахункового моделювання руху судна з урахуванням змінних гідрометеорологічних умов встановлено закономірності впливу різних стратегій керування на енергоефективність експлуатації контейнеровозів.

У результаті дослідження виявлено та кількісно оцінено так званий каскадний ефект стратегії Constant Speed для контейнеровозів з двигунами MC-серії. Показано, що при попутній течії понад приблизно 1,5 вузла зниження обертів головного двигуна нижче порогу стабільного продування призводить до активації допоміжних блоуерів і запуску додаткового дизель-генератора. Унаслідок цього значна частина очікуваної економії палива нівелюється зростанням допоміжного енергоспоживання, а реальна економія може бути на 38–50% меншою від теоретично очікуваної.

Порівняльний аналіз стратегій управління показав, що для суден із двигунами MC-серії стратегія Constant RPM забезпечує більш стабільний термодинамічний режим роботи головного двигуна та дозволяє утримувати його в зоні мінімального питомого споживання палива. За умов реальної експлуатації, коли необхідно забезпечити заданий час прибуття до порту, сумарна витрата палива при використанні CR-стратегії є на 3–7% нижчою, ніж при застосуванні Constant

Speed, оскільки остання потребує додаткового підвищення обертів на ділянках зі зустрічною течією.

Для суден із двигунами ME-серії вплив вибору стратегії управління виявився менш вираженим завдяки електронному управлінню процесами впорскування та продування. У цьому випадку різниця у витраті палива між стратегіями CS та CR не перевищує приблизно 1,5–2%, однак стратегія CR залишається більш стабільною з точки зору режиму роботи головного двигуна та кількості регулювань упродовж рейсу.

Отримані результати свідчать, що для маршрутів зі змінними гідрометеорологічними умовами ефективною експлуатаційною моделлю є поєднання стратегії Constant RPM із концепцією Just-in-Time Arrival. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи головного двигуна протягом більшої частини переходу та компенсувати відхилення від розкладу на завершальній ділянці рейсу без суттєвого зростання витрати палива.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів під час розроблення заходів підвищення енергоефективності суден у межах системи SEEMP та при плануванні режимів експлуатації контейнерних суден на океанських маршрутах зі змінними течіями. Отримані закономірності можуть бути використані для обґрунтування вибору стратегій управління головним двигуном з метою зниження витрат палива та покращення показників вуглецевої інтенсивності суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Калініченко Є. В., Шумило О. С., Кауров М. В. Розробка моделі управління енергоефективністю судна на різних етапах його життєвого циклу. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. 2021. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2021.002176>.
- [2] Деякі питання підвищення енергоефективності суден шляхом вдосконалення методів навігації: монографія / Є. В. Калініченко та ін.; за ред. Є.В. Калініченка. Таллінн: Scientific Route OÜ, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>.
- [3] Kuiken K. Diesel engines for ship propulsion and power plants. London : The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2012. 608 p.
- [4] Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 9th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2009. 912 p.
- [5] MAN Energy Solutions. Basic principles of ship propulsion. IMO. MEPC.337(76). Guidelines on the operational carbon intensity indicators (CII) and the rating mechanisms. London : International Maritime Organization, 2021.
- [6] IMO. MEPC.364(79). 2022 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators. London : International Maritime Organization, 2022.

- [7] IMO. MEPC.346(78). 2022 Guidelines on the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). London : International Maritime Organization, 2022.
- [8] Psaraftis H. N., Kontovas C. A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 26. Pp. 331–351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.012>.
- [9] Fagerholt K., Laporte G., Norstad I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes. *Journal of the Operational Research Society*. 2010. Vol. 61. No. 3. Pp. 523–529. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.77>.
- [10] Cariou P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2011. Vol. 16. No. 3. Pp. 260–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.005>.
- [11] Lindstad H., Asbjørnslett B. E., Strømman A. H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. No. 6. Pp. 3456–3464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.044>.
- [12] Notteboom T., Vernimmen B. The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping. *Journal of Transport Geography*. 2009. Vol. 17, no. 5. Pp. 325–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.05.003>.
- [13] Ronen D. The effect of oil price on containership speed and fleet size. *Journal of the Operational Research Society*. 2011. Vol. 62, no. 1. Pp. 211–216. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.169>.
- [14] Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2022. 56 p.
- [15] MAN Energy Solutions. Project guide – MC/MC-C marine engines. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2020.
- [16] IMO. Just-in-Time Arrival Guide – Barriers and potential solutions. London : International Maritime Organization, 2020.
- [17] BIMCO, International Chamber of Shipping. Shipping and world trade: the vital link. Brussels : BIMCO, 2023.
- [18] Hyundai Maritime Research Institute. Trim Optimization Tests for 13,800 TEU Class Container Carrier (2614–9, 2623–6): Report No. HMRI-2013-AB-011. Ulsan: HMRI, 2013. 76 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MAIN ENGINE OPERATING MODE CONTROL STRATEGIES FOR A CONTAINER SHIP ON THE PORT SAID – PORT KLANG ROUTE

Kalinichenko Y.V. PhD (Engineering), associate professor, Master Mariner, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

This article is devoted to a comparative analysis of strategies for managing the operating modes of a container ship's main engine during ocean voyages under conditions of variable hydro-meteorological factors. The relevance of this study stems from the increasing international requirements for energy efficiency in maritime transport and the reduction of greenhouse gas emissions. The paper examines three main strategies for controlling the main engine mode: maintaining a constant ship speed (Constant Speed), constant engine RPM (Constant RPM), and constant load (Constant Load). The study was conducted for two container ships of different generations – the CMA CGM VIRGINIA with a MAN B&W 10K98MC-C (MC series) and the THALASSA PATRIS with a MAN B&W 11S90ME-C9.2 engine (ME series) – on the Port Said – Port Klang route, which is characterized by significant changes in currents during the winter period. The analysis was performed based on a computational model that uses the propeller law for the “engine-fixed-pitch propeller” system and the specific fuel consumption characteristics of low-speed engines. The study found a cascade effect for MC-series engines when using the Constant Speed strategy: reducing engine speed in areas of strong favorable currents can lead to the activation of auxiliary blowers and an additional diesel generator, which negates 38-50% of the expected fuel savings. It has been shown that the Constant RPM strategy ensures a more stable engine operating mode and allows the engine to be maintained in the zone of minimum specific fuel consumption. For ME-series engines, the difference between the strategies is less pronounced. The results indicate that for container ships with MC-series engines on routes with variable hydro-meteorological conditions, the most effective strategy is Constant RPM combined with the Just-in-Time Arrival concept. The proposed approach ensures stable main engine operation, reduces total fuel consumption, and improves the vessel's carbon intensity in accordance with modern international environmental standards. The results obtained can be used in planning the operating modes of container ships and in developing energy efficiency improvement measures within the framework of the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

Keywords: ship energy efficiency; main engine; slow steaming; Constant Speed; Constant RPM; cascade effect; CII; Just-in-Time Arrival; MAN B&W; container ship.

References

- [1] *Guidelines on the Operational Carbon Intensity Indicators (CII) and the Rating Mechanisms*, IMO, МЕРС.337(76), International Maritime Organization, London, 2021.
- [2] *Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators*, IMO, МЕРС.364(79), International Maritime Organization, London, 2022.
- [3] *Guidelines on the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*, IMO, МЕРС.346(78), International Maritime Organization, London, 2022.
- [4] H. N. Psaraftis and C. A. Kontovas, “Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 26, pp. 331–351, 2013. doi: **10.1016/j.trc.2012.09.012**.
- [5] K. Fagerholt, G. Laporte, and I. Norstad, “Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, no. 3, pp. 523–529, 2010. doi: **10.1057/jors.2009.77**.
- [6] P. Cariou, “Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, no. 3, pp. 260–264, 2011. doi: **10.1016/j.trd.2010.12.005**.
- [7] H. Lindstad, B. E. Asbjørnslett, and A. H. Strømman, “Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 6, pp. 3456–3464, 2011. doi: **10.1016/j.enpol.2011.03.044**.
- [8] T. Notteboom and B. Vernimmen, “The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping,” *Journal of Transport Geography*, vol. 17, no. 5, pp. 325–337, 2009. doi: **10.1016/j.jtrangeo.2008.05.003**.
- [9] D. Ronen, “The effect of oil price on containership speed and fleet size,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 62, no. 1, pp. 211–216, 2011. doi: **10.1057/jors.2009.169**.
- [10] Ye. V. Kalinichenko, O. S. Shumylo, and M. V. Kaurov, “Rozrobka modeli upravlinnia enerhoefektyvnosti sudna na riznykh etapakh yoho zhyttievoho tsyклу” [“Development of a ship energy efficiency management model at different stages of its life cycle”], *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*, pp. 17–20, 2021. doi: **10.21303/2585-6847.2021.002176**.
- [11] Ye. V. Kalinichenko, *Deiaki pytannia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti suden shliakhom vdoskonalennia metodiv navihatsii: monohrafiia* [Some Issues of Improving the Energy Efficiency of Ships by Enhancing Navigation Methods]. Tallinn, Estonia: Scientific Route OU Publ., 2025. doi: **10.21303/978-9908-9706-4-6**.
- [12] K. Kuiken, *Diesel Engines for Ship Propulsion and Power Plants*. London: The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2012.
- [13] D. Woodyard, *Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, 9th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [14] MAN Energy Solutions, *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen, Denmark: MAN Energy Solutions, 2022.
- [15] MAN Energy Solutions, *Project Guide – MC/MC-C Marine Engines*. Copenhagen, Denmark: MAN Energy Solutions, 2020.
- [16] IMO, *Just-in-Time Arrival Guide – Barriers and Potential Solutions*. London, UK: International Maritime Organization, 2020.
- [17] BIMCO and International Chamber of Shipping, *Shipping and World Trade: The Vital Link*. Brussels, Belgium: BIMCO, 2023.
- [18] Hyundai Maritime Research Institute, *Trim Optimization Tests for 13,800 TEU Class Container Carrier (2614–9, 2623–6): Report No. HMRI-2013-AB-011*. Ulsan: HMRI, 2013.

Стаття надійшла 05.03.2026

Стаття прийнята 18.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Калініченко Є. В. Порівняльний аналіз стратегій управління режимами головного двигуна контейнеровоза на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 187–197. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359956>.