

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.63-77

INFLUENCE OF VESSEL SPEED ON THE THRUST AND POWER OF AUXILIARY WIND PROPULSORS

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ СУДНА НА ТЯГУ ТА ПОТУЖНІСТЬ ДОПОМІЖНИХ ВІТРОРУШІВ

M. V. Miyusov , D.Sc, professor, **O. F. Kryvyi** , D.Sc, professor

М. В. Міусов, д.т.н., професор, **О. Ф. Кривий**, д.ф.-м.н., професор

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

A feature of the operation of auxiliary wind propulsors is their joint operation with the main power plant, which provides the transmission of effective power to the propellers. An increase in the speed of the vessel causes a change in the speed and direction of the apparent wind, and, as a result, in the aerodynamic forces on the wind propulsors. Therefore, there is an urgent need to conduct a study of the dependence of the thrust and power of wind propulsors of different types on the speed of the vessel under different wind conditions, abstracting from the specific type of vessel. In this work, based on the proposed approach, mathematical modeling of the aerodynamic forces of wind propulsors on the speed of the vessel and the direction of the true wind is carried out. A significant dependence of the energy output of wind propulsors on the value of the vessel speed is shown. The dependences of the thrust and power of wind propulsors on the relative speed of the vessel are obtained at different values of the aerodynamic quality of wind propulsors. The dependences of the relative speed of the vessel, at which the maximum power of the wind propulsors is achieved, on its aerodynamic quality and the direction of the true wind, are also obtained. It is shown how the thrust and power of the wind propulsors depend on the relative speed of the vessel on the stern wind course. The ratios of the direction of the true wind, the aerodynamic quality of the wind propulsors and the speed of the vessel at which the power of the wind propulsors will reach the maximum value are found.

Keywords: ship's propulsion system, ship speed, wind speed and direction, wind propulsor, aerodynamic characteristics, thrust and power of the wind propulsor.

АНОТАЦІЯ

Особливістю роботи допоміжних вітрорушіїв є їх сумісна робота із головною силовою установкою, яка забезпечує передачу ефективної потужності на гребні гвинти. Збільшення при цьому швидкості судна спричиняє зміну швидкості і напрямку відчутного вітру, і, як наслідок, аеродинамічних сил на вітрорушіїх. Отже, виникає нагальна потреба провести дослідження залежності тяги і потужності вітрорушіїв різних типів від швидкості судна при різних вітрових умовах, абстрагуючись при цьому від конкретного типу судна. В даній роботі, на основі запропонованого підходу, проведено математичне моделювання аеродинамічних показників вітрорушіїв від швидкості судна і напрямку істинного вітру. Показана суттєва залежність енерговіддачі вітрорушіїв від значення швидкості судна. Отримані залежності тяги і потужності вітрорушіїв від відносної швидкості судна при різних значеннях аеродинамічної якості вітрорушіїв. Отримані також залежності відносної швидкості судна, при якій досягається максимум потужності вітрорушіїв, від його аеродинамічної якості і напрямку

істинного вітру. Показано, як залежать тяга і потужність вітрорушії від відносної швидкості судна на курсі фордевінд. Знайдені співвідношення напрямку істинного вітру, аеродинамічної якості вітрорушіїв і швидкості судна, при яких потужність вітрорушіїв буде досягати максимального значення.

Ключові слова: пропульсивний комплекс судна, швидкість судна, швидкість і напрям вітру, вітрорушій, аеродинамічні характеристики, тяга і потужність вітрорушії.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

На морські судна припадає до 90% загального обсягу вантажів, що перевозяться у світі. Зважаючи на зростаючу стурбованість глобальною зміною клімату, значну нестабільність цін на паливо та дедалі суворіші правила Міжнародної морської організації (ІМО), морський сектор активно шукає альтернативні енергетичні рішення для декарбонізації своїх суден. Згідно із стратегією ІМО по декарбонізації в судноплавстві, яка була прийнята ІМО в 2023 році, використання енергоефективних пропульсивних систем може зменшити викиди парникових газів від 5 до 15%. Серед доступних рішень для судновласників вітрові рушійні технології пропонують потенційний шлях до реалізації скорочення викидів парникових газів шляхом заміни частини рушійної сили енергією від прямого уловлювання вітру. Тому дослідження якісних характеристик вітрорушіїв (ВР), вивчення залежності тяги і потужності вітрильного оснащення від режимів роботи головної силової установки є важливою науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

В останній час різним аспектам використання вітрильного обладнання на комерційних судах присвячена значна кількість досліджень [1-30]. Зокрема, в роботі [5] виконано дослідження в аеродинамічній трубі взаємодії декількох вітрил із корпусом балкера, в роботі [6] за допомогою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса досліджено взаємодії вітрорушіїв із корпусом судна типу KVLCC2M і показано, що тяга гвинта може бути зменшена на 10 % під час плавання з боковим вітром, а максимальний ефект досягається під час плавання на низьких швидкостях в умовах сильного вітру. В роботі [7] розглянуті деякі аспекти взаємодії допоміжного вітрильного обладнання із головною енергетичною установкою. В статті [8] досліджено можливість використання жорсткого каскадного вітрила на комерційних судах. Для визначення коефіцієнтів підйомної сили і лобового спротиву використані випробування в аеродинамічній трубі та чисельні дослідження методом граничних елементів. В роботі [9] розроблено програмний інструмент для адаптування маршруту судна, оснащеного допоміжним вітрорушієм типу ротора Флеттнера, до фактичної погодної ситуації. В статті [10] також досліджено можливість використання вітрорушії типу ротора Флеттнера при експлуатації балкера на одному із маршрутів, і показано можливість зменшення річного споживання палива до 22%. Низка робіт [11-13] присвячена дослідженням можливості використання жорстких вітрорушіїв на сучасних судах, зокрема, з використанням віртуальної аеродинамічної труби та обчислювального аналізу гідродинаміки, побудовані поляри для сегментного жорсткого вітрила. В статті [15] на прикладі танкера, в умовах реального рейсу, досліджена енергоефективність для трьох різних типів допоміжного вітрорушійного обладнання, і виконаний порівняльний аналіз результатів. Ті ж аспекти досліджено в роботах [16, 21] для вітрорушіїв типу ротора Флеттнера. В статті [17] для оптимізації геометрії суднової вітрової силової установки застосовано генетичний алгоритм.

Аеродинамічні параметри вітрил визначаються за допомогою моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) і перевірялись експериментальними дослідженнями. В роботі [19] оптимізація спільної роботи дизеля і вітрила також виконано за допомогою генетичного алгоритму. В дослідженні [20] проведено порівняльний аналіз використання допоміжного вітрорухійного обладнання різного типу на комерційних судах. Загальні організаційно-економічні аспекти використання допоміжного вітрильного обладнання для досягнення декарбонізації для судноплавної галузі розглянуті в роботі [22]. В статті [23] методами CDF та емпіричних моделей досліджено додатковий опір, який викликаний вітрильним обладнанням. Розробці програми прогнозування продуктивності для вантажних суден із різним вітрорухійним обладнанням присвячена робота [26]. В статті [27] досліджена можливість для суден типу Ro-Ro використання гібридних систем енергії на основі електродвигуна і вітрорухія. В роботі [28] представлено комплексний інструмент чисельного моделювання для контейнеровоза із вітрорухіями, який використовується для оцінки продуктивності судна на реальних судноплавних маршрутах. В статті [29] для оптимізації курсу та швидкості судна, яке обладнане допоміжним вітрорухійним обладнанням, запропоновано підхід, який базується на комплексній системі маршрутизації погоди на судні з використанням продуктів CMEMS і алгоритму A*. Багато підходів до дослідження пропульсивного комплексу судна за наявності допоміжного вітрорухійного обладнання базуються на використанні математичної моделі пропульсивного комплексу судна [1-3, 14, 18, 24, 25, 30], яка визначає зворотній зв'язок із органами управління судна, та критерії керування [1, 3].

Незважаючи на значну кількість робіт в цьому напрямку, багато питань залишаються не достатньо досліджені, зокрема, вплив відносної швидкості судна і курсового кута істинного вітру на якісні характеристики вітрильного обладнання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціллю даної роботи є визначення залежностей тяги і потужності допоміжного вітрорухійного обладнання від швидкості судна і курсового кута істинного вітру.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Математичне моделювання аеродинамічних характеристик вітрорухіїв

Особливістю допоміжного вітрорухійного обладнання є його паралельна робота із головною силовою установкою судна, яка забезпечує передачу ефективної потужності на гвинти. Збільшення швидкості судна за рахунок підвищення пропульсивної потужності головної силової установки, призводить до зміни швидкості і напрямку відчутного вітру, а отже і аеродинамічних сил на вітрорухійному обладнанні.

Аеродинамічні характеристики вітрорухія (паруса), як правило, отримують в результаті випробувань в аеродинамічній трубі. В результаті випробувань визначають залежності трьох основних безрозмірних характеристик паруса: коефіцієнтів аеродинамічних сил лобового опору C_x , підйомної сили C_y і моменту C_m від кута атаки α повітряного потоку на судновий ВР:

$$C_x = C_x(\alpha), C_y = C_y(\alpha), C_m = C_m(\alpha). \quad (1)$$

Найбільш наглядно аеродинамічні характеристики суднового вітрила відображає залежність C_y від C_x , тобто функція $C_y = f(C_x)$, яку зображають графічно із відміткою на

кривій кутів атаки і називають полярою. На рис. 1 зображена поляра одиничного паруса і наведено трикутник швидкостей вітру і аеродинамічних сил на парусі.

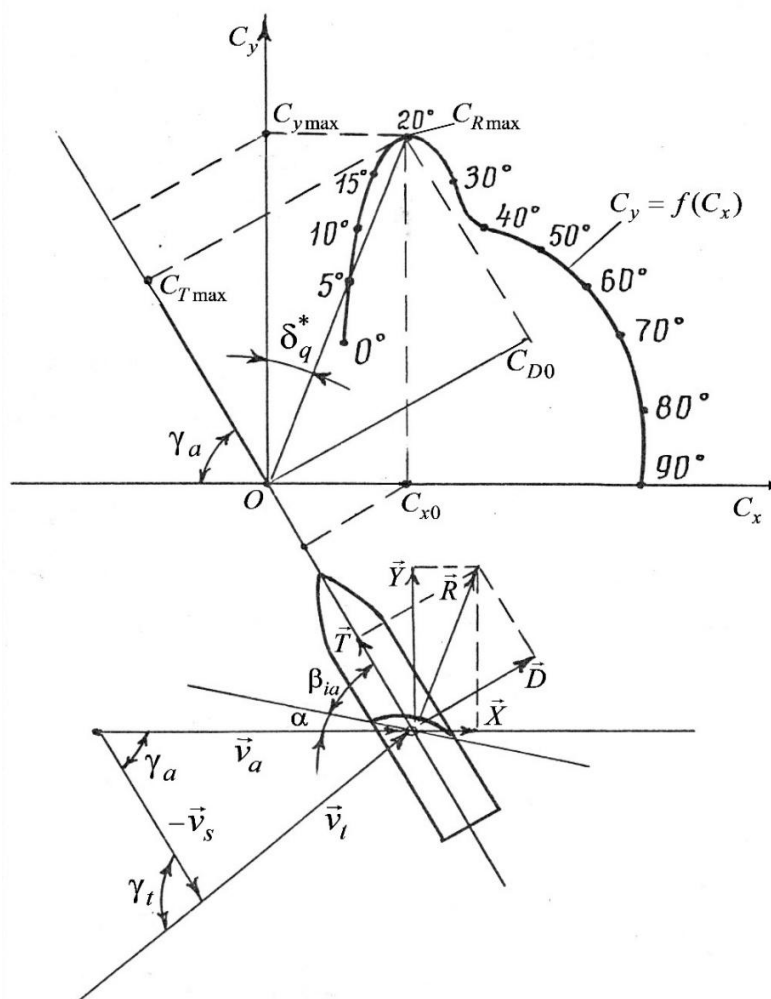


Рис. 1. Поляра одиничного паруса і трикутник швидкостей

Зауважимо, що на рис. 1 кут атаки α повітряного потоку на суднове вітрило – це кут між відчутним вітром і умовною площиною паруса, а β_{ia} – кут установки ВР, тобто кут між умовною площиною суднового вітрила і діаметральною площиною судна. Очевидно, справедлива формула:

$$\alpha = \gamma_a - \beta_{ia}. \quad (2)$$

де γ_a – курсовий кут відчутного вітру, тобто кут між курсом судна і напрямком відчутного вітру.

За допомогою коефіцієнтів (1) величину X сили аеродинамічного лобового спротиву $\vec{X}$ і величину Y підйомної сили $\vec{Y}$ подамо так

$$X = \frac{1}{2} C_x(\alpha) \rho_1 S v_a^2, \quad Y = \frac{1}{2} C_y(\alpha) \rho_1 S v_a^2 \quad (3)$$

де ρ_1 – щільність повітря; S – характерна площа вітрорушії; v_a – величина швидкості відчутного вітру.

Величина T аеродинамічної сили тяги $\vec{T}$ і величина D аеродинамічної сили дрейфу $\vec{D}$, згідно рис. 1, пов'язані із величинами (3) наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} T = Y \sin \gamma_a - X \cos \gamma_a, \\ D = Y \cos \gamma_a - X \sin \gamma_a, \end{cases} \quad (4)$$

За допомогою формул (3) і співвідношень (4) не важко встановити зв'язок між безрозмірними коефіцієнтами (1) та безрозмірними коефіцієнтами аеродинамічної тяги C_T і дрейфу C_D :

$$\begin{cases} C_T = C_y(\alpha) \sin \gamma_a - C_x(\alpha) \cos \gamma_a, \\ C_D = C_y(\alpha) \cos \gamma_a - C_x(\alpha) \sin \gamma_a. \end{cases} \quad (5)$$

Слід зауважити, що сума обох пар аеродинамічних сил $\vec{Y}$ і $\vec{X}$ а також $\vec{T}$ і $\vec{D}$, дорівнює результуючій аеродинамічній силі $\vec{R}$ на вітрорушії, тобто

$$\vec{R} = \vec{Y} + \vec{X} = \vec{T} + \vec{D}. \quad (6)$$

Швидкість відчутного вітру $\vec{v}_a$ на судні, що рухається, дорівнює векторній різниці швидкостей істинного вітру $\vec{v}_t$ швидкості судна по курсу (курсowa швидкість) $\vec{v}_s$, тобто: $\vec{v}_a = \vec{v}_t - \vec{v}_s$. Всі три сили утворюють трикутник швидкостей (див. рис. 1), із якого не важко отримати вирази для визначення величини швидкості і курсового кута відчутного вітру:

$$v_a = \sqrt{v_s^2 + v_t^2 + 2v_s v_t \cos \gamma_t}, \quad \gamma_a = \arccos \frac{v_s + v_t \cos \gamma_t}{v_a}, \quad (7)$$

де γ_t – курсовий кут істинного вітру, v_s , v_t – величини швидкостей відповідно судна і істинного вітру.

Із трикутника швидкостей можуть також бути отримані декілька виразів, які встановлюють зв'язок між параметрами відчутного і істинного вітру. Дійсно, згідно теореми синусів, можемо записати

$$\frac{v_t}{\sin \gamma_a} = \frac{v_a}{\sin \gamma_t} = \frac{v_s}{\sin(\gamma_t - \gamma_a)}. \quad (8)$$

Із співвідношень (8) легко отримати наступні рівняння для визначення кута γ_k відчутного вітру:

$$\operatorname{tg} \gamma_a = \frac{\sin \gamma_t}{\frac{v_s}{v_t} + \cos \gamma_t}. \quad (9)$$

$$\sin \gamma_a = \frac{v_t}{v_a} \sin \gamma_t. \quad (10)$$

$$\sin(\gamma_t - \gamma_a) = \frac{v_s}{v_a} \sin \gamma_t. \quad (11)$$

Крім того, за допомогою теореми тангенсів можна отримати наступне рівняння:

$$\operatorname{tg}(\gamma_a - \frac{\gamma_t}{2}) = \frac{v_t - v_s}{v_t + v_s} \operatorname{tg}(\frac{\gamma_t}{2}). \quad (12)$$

Аналіз залежностей (6) і рівнянь (9)-(12) показав, що для визначення кута відчутного вітру, який знаходиться на проміжку $[0; \pi]$, зручніше всього використовувати формулу (7), або рівняння (12), із якого

$$\gamma_a = \frac{\gamma_t}{2} + \arctg\left(\frac{v_t - v_s}{v_t + v_s} \operatorname{tg}(\frac{\gamma_t}{2})\right), \gamma_t \in (0; \pi). \quad (13)$$

Нехай δ_q – кут між векторами результуючої аеродинамічної сили $\vec{R}$ і підйомної сили $\vec{Y}$ (кут аеродинамічного якості), а C_R – безрозмірний коефіцієнт результуючої сили, який можна визначити так

$$C_R = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}, \quad (14)$$

тоді безрозмірні коефіцієнти аеродинамічної тяги C_T і дрейфу C_D , можна також визначити за формулами:

$$\begin{cases} C_T = C_R \cos(\frac{\pi}{2} + \delta_q - \gamma_a), \\ C_D = C_R \sin(\frac{\pi}{2} + \delta_q - \gamma_a). \end{cases} \quad (15)$$

Або

$$\begin{cases} C_T = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \sin(\gamma_a - \delta_q), \\ C_D = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \cos(\gamma_a - \delta_q). \end{cases} \quad (16)$$

Аеродинамічну якість вітрорушії характеризує величина

$$K = \frac{C_y}{C_x}, \quad (17)$$

яка, згідно формулам (1) є функцією кута атаки α повітряного потоку на суднове вітрило: $K = K(\alpha)$. Ця величина пов'язана із кутом аеродинамічної якості δ_q так:

$$\delta_q = \operatorname{arcctg} K(\alpha), \quad (18)$$

2. Вибір оптимального кута установки вітрорушії

Одним із основних параметрів вітрорушії при його використанні на судах є кут установки вітрорушії β_{ia} , який спільно із курсовим кутом відчутного вітру, згідно формулі (2) визначає кут атаки α повітряного потоку на суднове вітрило.

Кут β_{ia} змінюється в процесі експлуатації і покликаний забезпечити максимальну ефективність паруса, яка визначається, зокрема безрозмірним коефіцієнтом аеродинамічної тяги C_T . Одним із способів визначення оптимального кута установки паруса є графічний спосіб за допомогою поляри конкретного паруса.

Дійсно, на полірі паруса завжди можна знайти такий кут атаки α повітряного потоку на суднове вітрило, позначим його $\alpha_{\max}$, при якому величина Y аеродинамічної підйомної сили $\bar{Y}$ і коефіцієнт підйомної сили C_y будуть максимальними. Очевидно, що для зображеної на рис. 1 поляри, кут атаки $\alpha_{\max} = 20^\circ$ буде таким кутом. Введемо позначення $C_{y\max} = C_y(\alpha_{\max})$, $C_{x0} = C_x(\alpha_{\max})$, $C_{R\max} = C_R(\alpha_{\max})$, тоді згідно формулам (14) і (18) запишемо

$$C_{R\max} = \sqrt{C_{x0}^2 + C_{y\max}^2}, \quad (19)$$

$$\delta_q^* = \text{arcctg } K(\alpha_{\max}) = \text{arcctg } \frac{C_{y\max}}{C_{x0}}, \quad (20)$$

де δ_q^* – кут аеродинамічної якості для максимального значення коефіцієнта підйомної сили $C_{y\max}$.

Згідно формулі (2), значення кута атаки α повітряного потоку на ВР суттєво залежить від курсового кута відчутного вітру γ_a . В залежності від значення курсового кута γ_a суднове вітрило може переходити із режимів роботи «крило», зокрема, при курсах бейдевінд – галфвінд, в режим роботи «парашут» при курсах бакштаг – фордевінд. Останні курси можливі при так званих повних курсових кутах, які задовольняють умові:

$$\gamma_{p0} \leq \gamma_a \leq \pi. \quad (21)$$

де γ_{p0} – курсовий кут відчутного вітру, при якому вітрило переходить із режиму «крило» в режим «парашут».

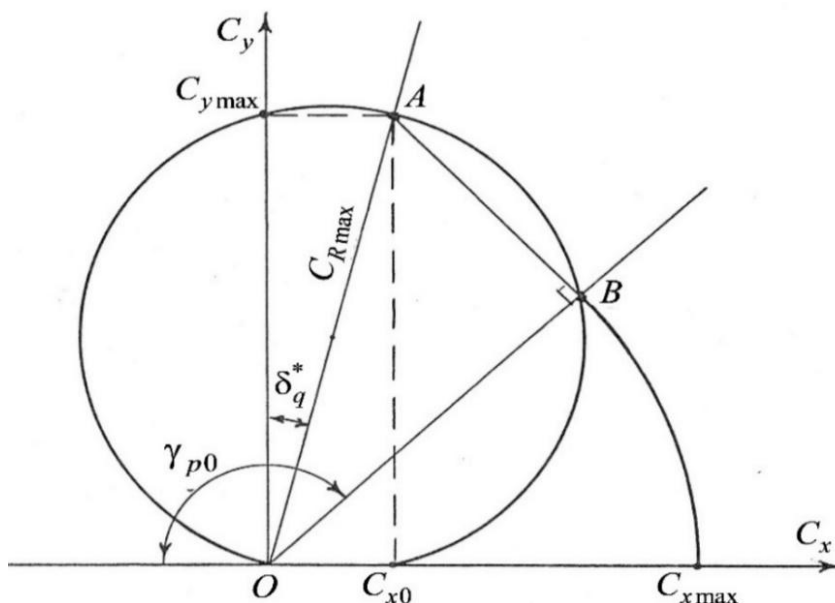


Рис.2. Визначення кута γ_{p0} зміни режимів роботи вітрорухія

При $\gamma_a > \gamma_{p0}$, безрозмірний коефіцієнт аеродинамічної тяги C_T , можна вважати рівним максимальному значенню коефіцієнту лобового опору $C_{x\max}$, значення останнього визначається експериментальним шляхом і може бути знайдено в характеристиках конкретного ВР. Значення кута γ_{p0} можна також визначити графічним методом в координатній площині (C_x, C_y) (рис. 2), в якій нанесем точку A із координатами $(C_{x0}, C_{y\max})$, і побудуємо коло діаметра OA і дугу із центром в точці O і радіуса $C_{x\max}$. Через точку перетину B кола і дуги проведемо промінь OB . Кут між від'ємною піввіссю осі абсцис і променем OB і буде дорівнювати γ_{p0} . Його значення легко знайти із прямокутного трикутника OBA :

$$\gamma_{p0} = \frac{\pi}{2} + \delta_q^* + \arccos \frac{C_{x\max}}{C_{R\max}}. \quad (22)$$

Отже, враховуючи вищесказане і формули (16), (19) і (20), для максимальних значень безрозмірних коефіцієнтів аеродинамічної тяги $C_{T\max}$ і дрейфу $C_{D\max}$, запишемо наступні вирази:

$$C_{T\max} = \begin{cases} C_{R\max} \sin(\gamma_a - \delta_q^*), & \delta_q^* < \gamma_a < \gamma_{p0}, \\ C_{x\max}, & \gamma_{p0} \leq \gamma_a \leq \pi. \end{cases} \quad (23)$$

$$C_{D\max} = \begin{cases} C_{R\max} \cos(\gamma_a - \delta_q^*), & \delta_q^* < \gamma_a < \gamma_{p0}, \\ 0, & \gamma_{p0} \leq \gamma_a \leq \pi. \end{cases} \quad (24)$$

3. Визначення залежності тяги і потужності вітрорушійів від швидкості судна

Отримана математична модель (23) для коефіцієнта аеродинамічної тяги дає можливість дослідити залежності величин аеродинамічної тяги T і потужності N_w вітрорушійів. Зокрема, при курсах бейдевінд та галфвінд (режим «крило»), тобто виконанні умови: $\delta_q^* < \gamma_a < \gamma_{p0}$, отримаємо наступні формули

$$T = \frac{1}{2} C_{R\max} \sin(\gamma_a - \delta_q^*) \rho_1 S v_a^2. \quad (25)$$

$$N_w = T v_s. \quad (26)$$

Перейдемо в формулах (25), (26) до безрозмірних величин

$$\tilde{T} = T / \kappa, \quad \tilde{N}_w = N_w / (\kappa \cdot v_t), \quad \tilde{v}_s = v_s / v_t, \quad \tilde{v}_a = v_a / v_t, \quad (27)$$

де $\kappa = \frac{1}{2} C_{R\max} \rho_1 S v_t^2$.

Скориставшись формулами (7), (25) – (27) для безрозмірних величин аеродинамічної тяги $\tilde{T}$ і потужності $\tilde{N}_w$ вітрорушійів, отримаємо наступні вирази

$$\tilde{T} = (\tilde{v}_s^2 + 1 + 2\tilde{v}_s \cos \gamma_t) \sin \left(\arccos \frac{\tilde{v}_s + \cos \gamma_t}{\sqrt{\tilde{v}_s^2 + 1 + 2\tilde{v}_s \cos \gamma_t}} - \delta_q^* \right). \quad (25)$$

$$\tilde{N}_w = \tilde{v}_s (\tilde{v}_s^2 + 1 + 2\tilde{v}_s \cos \gamma_t) \sin \left(\arccos \frac{\tilde{v}_s + \cos \gamma_t}{\sqrt{\tilde{v}_s^2 + 1 + 2\tilde{v}_s \cos \gamma_t}} - \delta_q^* \right). \quad (26)$$

При курсах відчутного вітру бакштаг та фордевінд (режим «парашут»), тобто при виконанні умови: $\gamma_{p0} \leq \gamma_a \leq \pi$, безрозмірний коефіцієнтів аеродинамічної тяги $C_{T\max}$, згідно формулі (23) дорівнює значенню коефіцієнта максимального спротиву $C_{x\max}$. В цьому випадку нормуючий коефіцієнт виберемо так: $\kappa_x = 0.5C_{x\max}\rho_1 S v_t^2$, а для безрозмірних величин аеродинамічної тяги $\tilde{T}$ і потужності $\tilde{N}_w$ вітрорушії, отримаємо наступні вирази

$$\tilde{T} = T / \kappa_x = (1 - \tilde{v}_s)^2, \quad \tilde{N}_w = N_w / (\kappa_x \cdot v_t) = \tilde{v}_s (1 - \tilde{v}_s)^2. \quad (27)$$

4. Числове моделювання

Отримані результати дозволяють провести числове дослідження поведінки тяги і потужності вітрорушіїв залежно від відносної швидкості судна.

Значення кута δ_q^* для основних типів суднових допоміжних вітрорушіїв, як правило, належить діапазону: $\delta_q^* \in [10^\circ; 30^\circ]$ і може бути визначене за допомогою таблиць [1], зокрема, для вітрорушіїв типу NKK (Nippon Kokan K.K.) $\delta_q^* \approx 20^\circ$.

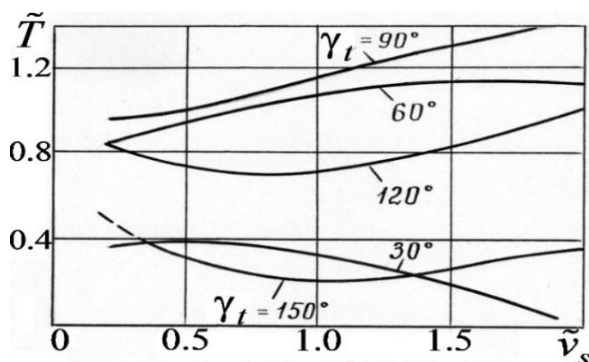


Рис. 3. Залежність тяги від швидкості, при $\delta_q^* = 10^\circ$, $K = 5.67$

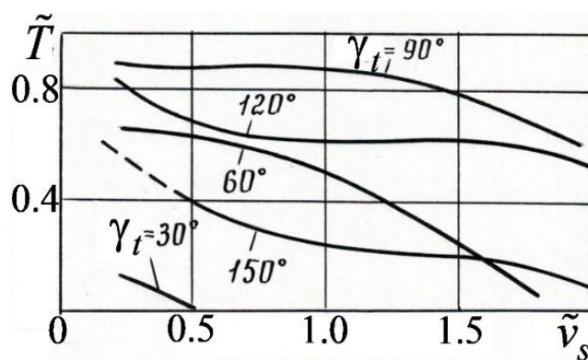


Рис. 4. Залежність тяги від швидкості, при $\delta_q^* = 20^\circ$, $K = 2.75$

Розрахунки залежностей (25), (26) проводились при різних значень кута $\delta_q^* \in [10^\circ; 30^\circ]$ для відносної швидкості судна $\tilde{v}_s$, яка змінювалась від 0.2 до 2.0, що відповідає діапазону швидкості зміни швидкості судна від 8 до 20 вузлів і істинного вітру від 5 м/с до 20 м/с.

Проведені розрахунки показали, що характер зміни тяги вітрорушіїв від швидкості судна визначається його аеродинамічною якістю, а саме:

- при високій аеродинамічній якості ($\delta_q^* = 10^\circ$, $K = 5.67$) для більшості курсових кутів істинного вітру при даних відносних швидкостях судна тяга вітрорушіїв із зростанням швидкості судна збільшується і не досягає максимуму (рис. 3);
- при середній аеродинамічній якості ($\delta_q^* = 20^\circ$, $K = 2.75$) із зростанням швидкості судна тяга вітрорушіїв спадає, але має майже горизонтальні ділянки, на яких швидкість зменшення тяги несуттєва (рис. 4);

- при відносно малій аеродинамічній якості ($\delta_q^* = 30^\circ$, $K = 1.73$) із зростанням швидкості судна тяга вітрорушії швидко зменшується (рис. 5).

Проведене дослідження пояснює причину якісних відмінностей окремих тягових характеристик, опис яких відомий на даний момент. Збільшення швидкості судна при бічних вітрах призводить до збільшення швидкості відчутного вітру, і одночасно до зменшення курсового кута відчутного вітру. Вказані фактори призводять протилежний вплив на зміну сили тяги вітрорушії. При цьому вирішальне значення має здатність вітрил підлаштовуватись до гострих курсових кутів відчутного вітру. Ця здатність характеризується аеродинамічною якістю вітрильного обладнання.

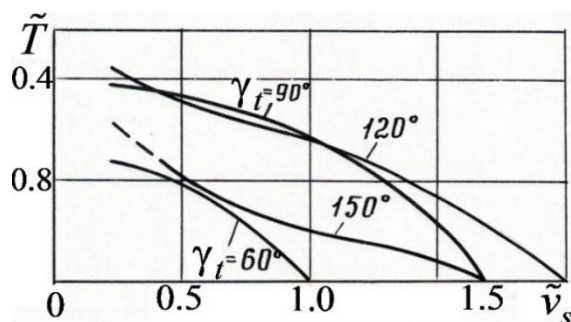


Рис. 5. Залежність тяги від швидкості, при $\delta_q^* = 30^\circ$, $K = 1.73$

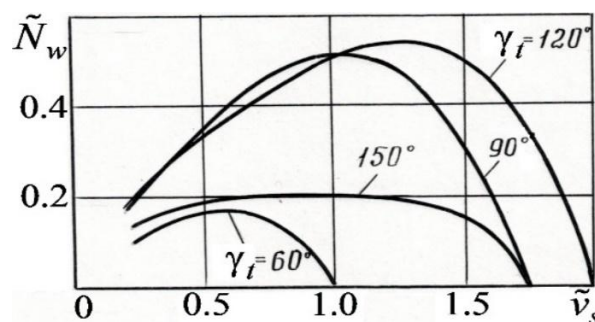


Рис. 6. Залежність потужності від швидкості, при $\delta_q^* = 30^\circ$

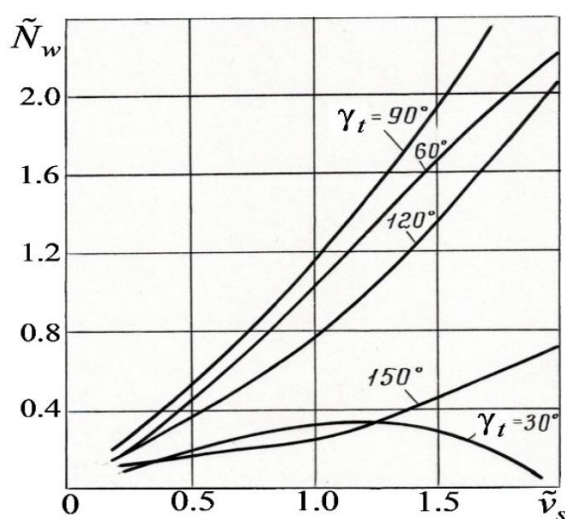


Рис. 7. Залежність потужності від швидкості, при $\delta_q^* = 10^\circ$

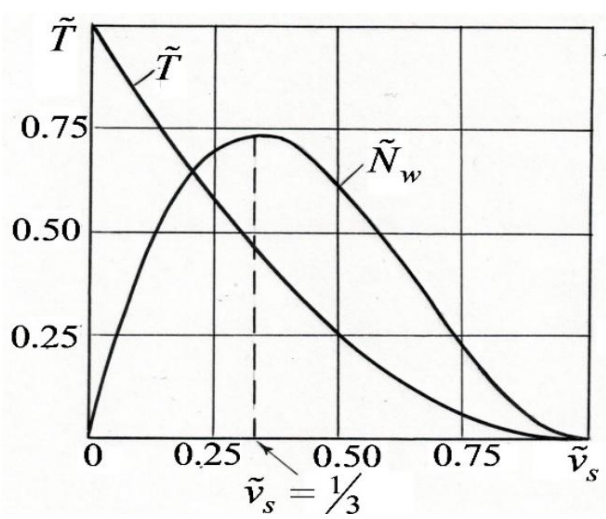


Рис. 8. Залежність тяги і потужності від швидкості на курсі фордевінд

В результаті числового моделювання поведінки потужності вітрорушії $\tilde{N}_w$ наведені на рисунках 6-7, при цьому:

- при $\delta_q^* = 10^\circ$ для більшості курсових кутів істинного вітру для розглянутого діапазону відносних швидкостей судна потужність вітрорушії збільшується, не досягаючи максимуму (рис. 7);

- при $\delta_q^* = 20^\circ$ максимум потужності досягається при високих безрозмірних швидкостях судна: $\tilde{v}_s = 1.2 \div 2.0$;
- при $\delta_q^* = 30^\circ$ максимум потужності досягається при відносно невисоких безрозмірних швидкостях судна: $\tilde{v}_s = 0.8 \div 1.2$ (рис. 6).

На рис. 8 показано характер зміни тяги і потужності вітрорушії при курсах відчутного вітру фордевінд від відносної швидкості судна. Аналіз результатів показує, потужність в цьому випадку має максимум при $\tilde{v}_s = \frac{1}{3}$.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Отже, в результаті досліджень отримані основні закономірності поведінки тяги і потужності вітрорушіїв в залежності від їх аеродинамічних характеристик, вітрових умов і швидкості судна, а саме:

- обґрунтована можливість ефективного використання ВР на відносно швидкісних судах, і вказані шляхи підвищення ефективності використання енергії вітру вітрильним обладнанням судна;
- відносно висока швидкість сучасних транспортних суден обумовлює високу ймовірність роботи вітрорушіїв на курсах бейдевінд. У зв'язку із цим, ВР повинні бути пристосовані до ефективної роботи на цих курсах, тобто мати високу аеродинамічну якість;
- підтверджено, що при курсах відчутного вітру фордевінд, максимальна потужність вітрорушіїв досягається при швидкості судна в три рази менше швидкості істинного вітру, це відповідає швидкості відчутного вітру, який в два рази перевищує швидкість судна;
- при оцінці ефективності вітрорушіїв необхідно враховувати швидкохідність судна і характеристики розподілу ймовірності вітрів в районі експлуатації судна. Останнє і повинно становити напрямок подальших досліджень при використанні додаткового вітрильного оснащення.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] М. В. Міюсов, Режими роботи та автоматизація пропульсивного комплексу теплохода з вітродвигуном. Одеса: ОДМА, ОКФА, 1996 г.
- [2] О. Ф. Кривий, Методи математичного моделювання в задачах судноводіння, ОНМА, Одеса. 2015.
- [3] М. В. Міюсов, О. Ф. Кривий, “Методи оптимізації режимів роботи суднового пропульсивного комплексу”, *Суднові енергетичні установки*, по. 8, pp. 39–48, 2003.
- [4] О. Ф. Кривий, М. В. Міюсов, “Математическая модель плоского движения судна при наличии ветродвижителей”, *Судноводіння*, № 26, С.110-119, 2016.
- [5] T. Fujiwara, G. Hearn, F. Kitamura, *et al.* “Sail–sail and sail–hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier”. *J Mar Sci Technol*, vol. 10, pp. 82–95, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00773-005-0191-4>.
- [6] I. M. Viola, M. Sacher, J. Xu, F. Wang. “A numerical method for the design of ships with wind-assisted propulsion”, *Ocean Engineering*, vol. 105: pp. 33-42, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.009>.

- [7] P. Kindberg *Wind-powered auxiliary propulsion in cargo ships*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Bachelor of Engineering Environmental engineering. 2015. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015090914465>
- [8] Qiao Li, et al. "A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels", *Ocean Engineering*, vol. 98, pp. 23-31, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.02.005>.
- [9] M. Bentin, et al. "A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems", *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 153-162, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051>
- [10] I.S. Seddiek, N.R. Ammar, "Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers", *Environ Sci Pollut Res*, vol.28, pp. 32695–32707, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12791-3>
- [11] G. Atkinson, H. Nguyen, J. Binns & D. Pham, "Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships". *Cogent Engineering*, vol. 5, no.1, 2018 <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1543564>
- [12] G. Atkinson, & J. Binns, "Power profile for segment rigid sail", *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 99–105, 2018. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1319997>
- [13] G. Atkinson, "Analysis of lift, drag and C_x polar graph for a 3D segment rigid sail using CFD analysis", *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 18, no.1, pp.36–45, 2019. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1494953>
- [14] O. F Kryvyi, M. V. Miyusov (2019). Mathematical model of hydrodynamic characteristics on the ship's hull for any drift angles. *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press: 111-117. <https://doi.org/10.1201/9780429341939>
- [15] R. Lu, & J. W. Ringsberg, "Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology", *Ships and Offshore Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 249–258. 2020. <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544>
- [16] N. I. B. Ariffin and M. A. Hannan, "Wingsail technology as a sustainable alternative to fossil fuel," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 788 012062. 2020. Doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012062
- [17] J. Cairns, et al. "Numerical optimisation of a ship wind-assisted propulsion system using blowing and suction over a range of wind conditions," *Ocean Engineering*, vol. 240, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109903>.
- [18] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, "Construction and Analysis of Mathematical Models of Hydrodynamic Forces and Moment on the Ship's Hull Using Multivariate Regression Analysis," *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 15, no. 4, pp. 853-864, 2021. doi:10.12716/1001.15.04.18
- [19] K. Wang, et al. "Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping", *Energy, Elsevier*, vol. 245(C). 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123155
- [20] Y. Wang, et al. "Analysis on the Development of Wind-assisted Ship Propulsion Technology and Contribution to Emission Reduction", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, 966 012012. DOI 10.1088/1755-1315/966/1/012012

- [21] N. R. Ammar & I. S. Seddiek, ‘Wind assisted propulsion system onboard ships: case study Flettner rotors’, *Ships and Offshore Structures*, vol. 17, no. 7, 1616–1627, 2022. <https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1937797>
- [22] De. C. Beukelaer, “Tack to the future: is wind propulsion an ecomodernist or degrowth way to decarbonise maritime cargo transport”, *Climate Policy*, vol. 22, no. 3, pp. 310–319, 2022. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1989362>
- [23] J. V. Kramer, S. Steen, “Sail-induced resistance on a wind-powered cargo ship”, *Ocean Engineering*, vol. 261, 111688, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111688>.
- [24] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, M. Kryvyi, “Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes”, *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 1, pp. 853-864, 2023. doi:10.12716/1001.17.01.09
- [25] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, M. Kryvyi, “Analysis of Known and Construction of New Mathematical Models of Forces on a Ship's Rudder in an Unbounded Flow Analysis,” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 4, pp. 831-839, 2023. DOI:10.12716/1001.17.04.09
- [26] M. Reche-Vilanova, H. Hansen, & H. B. Bingham. "Performance Prediction Program for Wind-Assisted Cargo Ships," *J Sailing Technol*, vol. 6, pp. 91–117, 2021. doi: <https://doi.org/10.5957/jst/2021.6.1.91>
- [27] Thies, F., & Ringsberg, J. W. Wind-assisted, electric, and pure wind propulsion – the path towards zero-emission RoRo ships. *Ships and Offshore Structures*, 18(8), 2023. 1229–1236. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2111923>
- [28] M. Ghorbani, P. Slaets, J. Lacey, “A numerical simulation tool for a wind-assisted vessel verified with logged data at sea”, *Ocean Engineering*, vol. 290, 116319, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116319>
- [29] Cong Wang, et al. A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A* algorithm, *Ocean Engineering*, 302, 2024, 117669, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
- [30] М. В. Міусов, О. Ф. Кривий, “Оптимальне управління комбінованим пропульсивним комплексом судна з вітрорушіями”, *Судноводіння*, вип. 36, с. 116 – 130, 2024. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.116-130

REFERENCES

- [1] M. V. Miyusov, *Rezhimy roboty i avtomatizatsiya propul'syvnogo kompleksa teplokhoda s vitrodivizhitelyami*. Odesa: OGMA, OKFA, 1996 g.
- [2] O. F. Kryvyi, *Metody matematychnoho modeliuvannia v zadachakh sudnovodinnia*, ONMA, Odesa. 2015.
- [3] M. V. Myusov, A. F. Kryvoy, “Metody optimizatsii rezhimiv roboty sudnovogo propul'sivnogo kompleksa”, *Sudnovi energetychni ustanovky*, no. 8, pp. 39-48, 2003.
- [4] A. F. Kryvoy, M. V. Miyusov, "Matematicheskaya model ploskogo dvizheniya sudna pri nalichii vetrodivizhitelyey", *Sudnovodinnia*, no. 26, pp. 110-119, 2016.
- [5] T. Fujiwara, G. Hearn, F. Kitamura, *et al.* “Sail–sail and sail–hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier”. *J Mar Sci Technol*, vol. 10, pp. 82–95, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00773-005-0191-4>.

- [6] I. M. Viola, M. Sacher, J. Xu, F. Wang. “A numerical method for the design of ships with wind-assisted propulsion”, *Ocean Engineering*, vol. 105: pp. 33-42, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.009>.
- [7] P. Kindberg *Wind-powered auxiliary propulsion in cargo ships*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Bachelor of Engineering Environmental engineering. 2015. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015090914465>
- [8] Qiao Li, et al. “A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels”, *Ocean Engineering*, vol. 98, pp. 23-31, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.02.005>.
- [9] M. Bentin, et al. “A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems”, *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 153-162, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051>
- [10] I.S. Seddiek, N.R. Ammar, “Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers”, *Environ Sci Pollut Res*, vol.28, pp. 32695–32707, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12791-3>
- [11] G. Atkinson, H. Nguyen, J. Binns & D. Pham, “Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships”. *Cogent Engineering*, vol. 5, no.1, 2018. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1543564>
- [12] G. Atkinson, & J. Binns, “Power profile for segment rigid sail”, *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 99–105, 2018. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1319997>
- [13] G. Atkinson, “Analysis of lift, drag and C_x polar graph for a 3D segment rigid sail using CFD analysis”, *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 18, no.1, pp.36–45, 2019. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1494953>
- [14] O. F Kryvyi, M. V. Miyusov (2019). Mathematical model of hydrodynamic characteristics on the ship's hull for any drift angles. *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press: 111-117. <https://doi.org/10.1201/9780429341939>
- [15] R. Lu, & J. W. Ringsberg, “Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology”, *Ships and Offshore Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 249–258. 2020. <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544>
- [16] N. I. B. Ariffin and M. A. Hannan, “Wingsail technology as a sustainable alternative to fossil fuel,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 788 012062. 2020. Doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012062
- [17] J. Cairns, et al. “Numerical optimisation of a ship wind-assisted propulsion system using blowing and suction over a range of wind conditions,” *Ocean Engineering*, vol. 240, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109903>.
- [18] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, “Construction and Analysis of Mathematical Models of Hydrodynamic Forces and Moment on the Ship's Hull Using Multivariate Regression Analysis,” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 15, no. 4, pp. 853-864, 2021. doi:10.12716/1001.15.04.18
- [19] K. Wang, et al. “Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping”, *Energy, Elsevier*, vol. 245(C). 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123155

- [20] Y. Wang, et al. "Analysis on the Development of Wind-assisted Ship Propulsion Technology and Contribution to Emission Reduction", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, 966 012012. DOI 10.1088/1755-1315/966/1/012012
- [21] N. R. Ammar & I. S. Seddiek, "Wind assisted propulsion system onboard ships: case study Flettner rotors", *Ships and Offshore Structures*, vol. 17, no. 7, 1616–1627. 2022. <https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1937797>
- [22] De. C. Beukelaer, "Tack to the future: is wind propulsion an ecomodernist or degrowth way to decarbonise maritime cargo transport", *Climate Policy*, vol. 22, no. 3, pp. 310–319, 2022. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1989362>
- [23] J. V. Kramer, S. Steen, "Sail-induced resistance on a wind-powered cargo ship", *Ocean Engineering*, vol. 261, 111688, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111688>.
- [24] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, M. Kryvyi, "Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes", *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 1, pp. 853-864, 2023. doi:10.12716/1001.17.01.09
- [25] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, M. Kryvyi, "Analysis of Known and Construction of New Mathematical Models of Forces on a Ship's Rudder in an Unbounded Flow Analysis," *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 4, pp. 831-839, 2023. DOI:10.12716/1001.17.04.09
- [26] M. Reche-Vilanova, H. Hansen, & H. B. Bingham. "Performance Prediction Program for Wind-Assisted Cargo Ships," *J Sailing Technol*, vol. 6, pp. 91–117, 2021. doi: <https://doi.org/10.5957/jst/2021.6.1.91>
- [27] Thies, F., & Ringsberg, J. W. Wind-assisted, electric, and pure wind propulsion – the path towards zero-emission RoRo ships. *Ships and Offshore Structures*, 18(8), 2023. 1229–1236. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2111923>
- [28] M. Ghorbani, P. Slaets, J. Lacey, "A numerical simulation tool for a wind-assisted vessel verified with logged data at sea", *Ocean Engineering*, vol. 290, 116319, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116319>
- [29] Cong Wang, et al. A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A* algorithm, *Ocean Engineering*, 302, 2024, 117669, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
- [30] M. V. Miyusov, O. F. Kryvyi, "Optymalne upravlinnia kombiinovanyh propulsiynym kompleksom sudna z vitrorushiiamy", *Sudnovodinnia*, vyp. 36, pp. 116–130, 2024. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.116-130.