

УДК 629.12-8:629.12.037
DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-47-63

**ВПЛИВ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ
НА МАНЕВРЕНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОХОДІВ
ПРИ ЇХ ЦИРКУЛЯЦІЙНОМУ РУСІ**

О.М. Шумило

к.т.н., доцент кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація»

В.О. Яровенко

д.т.н. завідувач кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

М.О. Малаксіано

д.т.н., завідувач кафедри «Технічна кібернетика
й інформаційні технології ім. проф. Р.В. Меркта»

О.І. Зарицька

к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Метою дослідження є розробка методу оцінки впливу підрулюючих пристроїв на показники керованості електроходів при виході на циркуляцію.

При виконанні маневрених операцій всі складові пропульсивних комплексів електроходів безперервно працюють на перехідних режимах. Аналіз маневрених властивостей у таких умовах повинен проводитись з урахуванням сумісної роботи всіх складових частин єдиного суднового пропульсивного комплексу.

Критеріями якості обрано показники Стандарту маневреності, та показники якості функціонування суднової електроенергетичної установки. В основу розрахунку режимів роботи підрулюючих пристроїв закладено аналітичний метод, який дозволяє оцінювати тягу та момент опору гвинтів на перехідних режимах, з врахуванням гідродинамічних процесів їх взаємодії з корпусом судна. Розроблено метод оцінки маневрених характеристик пропульсивних комплексів з урахуванням навантажень на їх електроенергетичні установки. Виявлено ступінь впливу швидкості руху судна на показники маневреності при виході на криволінійну траєкторію. Показано, що істотний вплив підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики проявляється на невеликих швидкостях руху. Навантаження на суднову електроенергетичну систему не виходять за допустимі межі.

Метод розрахунку дає можливість оцінювати показники маневреності електроходів та показники якості їх електроенергетичних установок. З'являється можливість прогнозування маневрених властивостей суднових пропульсивних комплексів з підрулюючими пристроями.

Прикладні програми та результати досліджень відкривають можливості оптимізації управління електроенергетичними установками.

Ключові слова: електрохід, пропульсивний комплекс, гребна електроенергетична установка, пристрої, тяга та момент опору гвинтів, аналітичний метод розрахунку, циркуляційний рух, показники маневреності, вплив швидкості судна.

UDC 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-47-63

**INFLUENCE OF THRUSTERS
ON THE ELECTRIC SHIPS' MANEUVERING CHARACTERISTICS
DURING THEIR CIRCULATION RUN**

O. Schumylo

Ph.D, Professor of the Department of «Ship Power Plants and Technical Operation»

V. Yarovenko

Dr. of Eng., Head of the Department of «Operation of Ship's Electrical Equipment and Automation»

M. Malaksiano

Dr. of Eng., Head of the Department of «Technical Cybernetics and Information Technology after Prof. R.V. Merkt»

O. Zaritska

PhD, Associate Professor of the Department of «Operation of Ship's Electrical Equipment and Automation»

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The purpose of the study is to develop a method for assessing the influence of thrusters on the electric ships' controllability indicators when entering circulation.*

When performing maneuvering operations, all components of the electric ships' propulsion systems continuously operate in transient modes. The analysis of maneuvering properties in such conditions should be carried out considering the joint operation of all components of a ship's propulsion system.

The indicators of the Maneuverability Standard and the quality indicators of the functioning of the ship's electric power plant were chosen as the quality criteria. The calculation of the thrusters' operating modes is based on an analytical method that allows estimating the thrust and resistance moment of the propellers in transient modes, taking into account the hydrodynamic processes of their interaction with the ship's hull. A method for assessing the maneuvering characteristics of propulsion systems has been developed, taking into consideration the loads on their electric power plants. The degree of influence of the ship's speed on maneuverability indicators when entering a curvilinear trajectory has been revealed. It is shown that the significant influence of thrusters on maneuvering characteristics is manifested at low speeds. The loads on the ship's electrical power system do not exceed the permissible limits.

The calculation method makes it possible to evaluate the electric ships' maneuverability indicators and the quality indicators of their electrical power plants. It becomes possible to predict maneuvering properties of ships' propulsion complexes with thrusters.

Applied programs and research results open up opportunities for optimizing the control of electrical power plants.

Keywords: *electric ship, propulsion complex, propulsion electrical power plant, thrusters, propellers' thrust and resistance moment, analytical calculation method, circulation motion, maneuverability indicators, influence of ship's speed.*

Актуальність. Однією з основних функціональних якостей судна є його керованість. Керованість визначається навігаційними якостями судна – його поворотністю та стійкістю на курсі. Поворотність характеризує здатність судна до зміни курсу під час руху криволінійною траєкторією. Вона значною мірою визначає і експлуатаційні можливості судна і безпеку плавання.

Традиційно, основним засобом управління судном було і є кермо. Однак дія керма ефективна лише при наявності суттєвої швидкості руху судна. У певних умовах експлуатації розвинути швидкість, достатню для ефективного управління судном, неможливо. Саме погана керованість суден у таких умовах була причиною більшості аварій. Для забезпечення керованості на малому ході і без ходу на судах встановлюють системи активного управління (САУ) рухом. У якості таких пристроїв частіше за все використовують підрулюючі пристрої (ПП). Вони можуть

Дослідженням керованості суден присвячено фундаментальні роботи відомих вчених у галузі керованості суднами та кораблями [1; 2; 3; 4]. Але, при аналізі маневрених характеристик таких об'єктів, автори зазвичай розглядають процес руху лише корпусу судна, намагаючись не торкатися його гребної установки, уникати питань взаємодії рушіїв з корпусом судна. Найчастіше в роботах вирішуються питання удосконалення конструктивних параметрів підрулюючих пристроїв [7], поліпшення режимів роботи їх гребних гвинтів, створення програмного забезпечення тренажерів, на яких мають відпрацьовуватися прийоми управління рухом судна [5; 6] та інш. Передбачається, що гребні двигуни і підрулюючі пристрої працюють у сталому режимі. Тим самим корпус судна, по суті, відокремлюється від єдиного судового пропульсивного комплексу, та розглядається як окремий рухомий об'єкт, гребна установка якого працює в усталеному режимі.

Однак дослідження, результати яких наведені в роботах [8; 9], показали що з виходом судна на циркуляцію, швидкість його руху падає, внаслідок чого зростає момент опору гребних гвинтів, збільшуються навантаження на гребні електродвигуни та на електроенергетичну установку. Частота обертання гребних гвинтів зменшується, що веде до подальшого зниження швидкості руху судна. Оскільки ступінь зниження швидкості судна впливає на момент опору гребних гвинтів, вона буде впливати і на показники роботи всієї судової електроенергетичної установки, та, відповідно, на показники маневреності судна. Виходячи з цього, для коректного аналізу показників поворотності судна необхідно розглядати єдиний судовий пропульсивний комплекс, який включає в себе (як нерозривні складові частини) і корпус судна, і гребні гвинти, і кермо, і підрулюючі пристрої, і судову електроенергетичну установку. Розробка методу оцінки впливу швидкості виходу судна на криволінійну траєкторію на маневрені характеристики судового пропульсивного комплексу є актуальним завданням.

Метод аналізу. Відповідно до Конвенції про Міжнародну морську організацію, до стандартів маневреності суден належить (Додаток 6 Резолюції MSC.137(76)) маневр циркуляції, який виконується поворотом керма на 35° або максимально допустимий кут повороту на тестовій швидкості. Його показники:

- висування – відстань X_1 , яка пройдена міделем у прямому напрямку до положення, що відповідає зміні курсу на 90° ;

- тактичний діаметр – відстань D_{CT} , яка пройдена міделем від початку повороту, до положення, що відповідає зміні курсу на 180° .

Вимоги Стандарту маневреності не поширюються на судна з активними пристроями управління, але незважаючи на це, оцінюватимемо маневрені властивості судна за параметрами, зазначеними саме в Стандарті.

У теорії керованості суден для повної оцінки маневру циркуляції до перерахованих показників прийнято додавати:

- діаметр усталеної циркуляції – відстань D_C між положеннями діаметральної площини судна на двох послідовних курсах, що відрізняються на 180° при встановленому русі;

- пряме усунення судна – відстань Y_1 від лінії початкового курсу за нормаллю до центру тяжіння судна, на момент зміни курсу на 90° ;

- кутову швидкість обертання судна навколо вертикальної осі $Z - \Omega_Z$;

- Δv_C – зниження швидкості руху судна при виході на усталену циркуляцію;

- тривалість маневру T_C .

Якісне виконання маневру (забезпечення необхідних чисельних значень перелічених показників) насамперед визначається можливостями суднової електроенергетичної установки (СЕЕУ), перевантажувальними здібностями її складових частин. З виходом судна на криволінійну траєкторію навантаження на гребну установку змінюються. Виходячи з цього, до показників циркуляційного руху судна необхідно додати також показники, які характеризують роботу самої СЕЕУ. Насамперед, це зміни у процесі маневрування:

- кутової швидкості обертання гребних електродвигунів (ГЕД) та гребних гвинтів – $\Delta \omega_M$;

- крутного моменту ΔM_M і струму ΔI_M гребних електродвигунів;

- потужності теплових двигунів генераторних агрегатів – ΔP_D ;

- напруги та частоти струму на шинах суднової електростанції.

Особливу увагу при аналізі режимів роботи суднової електроенергетичної установки слід приділяти впливу на її показники роботи підрулюючих пристроїв. ПП – це один з найбільш потужних споживачів електроенергії на судні. Навіть для суден з помірним ступенем маневреності частка потужності (коефіцієнт k_{TR}) електродвигунів ПП відносно потужності гребної електроенергетичної установки (ГЕЕУ) доходить до $k_{TR} = 0,24$. Їх робота дуже суттєво впливає на роботу всієї суднової електростанції, на якість електроенергії суднової мережі [9]. Всі показники СЕЕУ мають певні обмеження на допустимий діапазон зміни їх значень,

тому у процесі маневрування їх необхідно контролювати. Все це означає, що в процесі проектування, модернізації, експлуатації електроходів необхідно з одного боку досягти необхідних маневрених властивостей судна, а з другого боку – забезпечити належний режим роботи і суднових джерел електроенергії, і загально-суднових споживачів.

Відповідно до Стандарту, маневреність суден може бути оцінена за результатами випробування масштабних моделей, або за результатами комп'ютерних прогнозів з використанням математичних моделей. Відповідно до цих вимог, для оцінки основних показників циркуляційного руху судна можна скористатися структурною схемою та математичною моделлю пропульсивного комплексу, запропонованою в роботі [8]. Математична модель відноситься до пропульсивного комплексу з єдиною судною електроенергетичною установкою та класичним варіантом побудови гребної установки без САУ курсом судна.

Відповідно до поняття наближеного динамічно еквівалентного комплексу [10; 11; 14], вона переведена до системи безрозмірних одиниць [13; 14]. Відносні значення режимних показників визначаються як відношення поточних значень до базових значень. Вони позначатимуться символом із рискою зверху. В якості базових (відзначені індексом «0») приймаються значення, які відповідають роботі комплексу в номінальному усталеному режимі при русі судна по вільній, глибокій, спокійній воді прямим курсом.

З включенням до складу пропульсивного комплексу підрулюючих пристроїв, рівняння математичної моделі руху судна зазнають істотних змін. У правих частинах рівнянь з'являються додаткові сили та моменти від дії ПП. Складові швидкості руху електрохода вздовж осей X , Y і швидкість повороту навколо осі Z у пов'язаній з судном системі координат $GXYZ$ набудуть наступного вигляду:

$$\frac{d\overline{v}_X}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v}_Y \overline{\Omega}_Z + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} \overline{P}_{ej} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v}^2 - \overline{R}_X \right\}; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{v}_Y}{dT} = & -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v}_X \overline{\Omega}_Z + \\ & + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_j K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P}_{ej} + C_{RY} \beta_{RP} \overline{v}^2 \pm \sum_h k_h \overline{P}_{Thh} - \overline{R}_Y \right\} \end{aligned}; \quad (2)$$

$$\frac{d\overline{\Omega}_Z}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v}_X \overline{v}_Y + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P}_{ej} + C_{RY} \overline{X}_R \beta_{RP} \overline{v}^2 \pm \right. \\ \left. \pm \sum_h k_h \overline{P}_{Thh} h_h + (\overline{M}_{PZ} - \overline{M}_{DZ}) \right\}, \quad (3)$$

де T – відносний (безрозмірний) час $T = \frac{v_0}{L} t$,

v_0 – швидкість судна;

L – довжина судна;

t – поточний час;

$\overline{v_X}$ і $\overline{v_Y}$ – складові швидкості руху судна уздовж осей X і Y ;

$\overline{\Omega_Z}$ – кутова швидкість повороту судна навколо осі Z ;

$\overline{R_X}$ – поздовжня складова опору води руху судна;

$\overline{R_Y}$ – поперечна складова опору води руху судна;

$(\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}})$ – позиційна та динамічна складові моменту опору повороту судна навколо осі Z ;

$\sum_h k_h \overline{P_{Thh}}$ – сумарний упор гвинтів підрулюючих пристроїв;

$\sum_h k_h \overline{P_{Thh}} \overline{h_h}$ – сумарний крутний момент від гвинтів підрулюючих пристроїв,

щодо центру тяжіння судна;

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2} \quad - \quad \text{критерії динамічної}$$

подібності;

$$\overline{h_h} = \frac{h_h}{L} \quad - \quad \text{координата (відносна величина) прикладання тяги гвинта};$$

X_R – відстань від центру системи координат до керма;

P_{ej} , $\overline{P_{ej}}$ та K_{Pj} – корисний упор гребного гвинта, його відносна величина та

частка у сумарному упорі відповідно;

m – маса судна;

ρ – питома густина води;

λ_{11} і λ_{22} – приєднані маси води вздовж осей X і Y ;

J_Z – момент інерції судна під час обертання навколо осі Z ;

λ_{66} – приєднаний момент інерції води;

β_{dr} – кут дрейфу;

$\overline{P_{Thh}}$, $\overline{h_h}$ і k_h – відносні упор, його плече та частка упору відповідного гвинта ПП, при максимальному кроковому відношенні у сумарному упорі пропульсивних гребних гвинтів;

$C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$, $C_{\lambda 2}$ – безрозмірні параметри пропульсивного комплексу.

Кут атаки керма

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_C \left(\arctg \beta_{dr} - \varepsilon \frac{\overline{\Omega_Z}}{v} \right), \quad (4)$$

де β_R – кут повороту керма;

χ_C – коефіцієнт впливу корпусу електрохода та його гвинтів на кермо;

ε – величина, що визначається відношенням l_R/L

(l_R – відстань між кермом та мідель-шпангоутом).

Пропонується [10] в основу гідродинамічного розрахунку гвинтів підрулюючих пристроїв закласти відомий метод Гофмана. Метод побудовано на базі діаграм серійних випробувань гребних гвинтів у тонкій циліндричній трубі.

Це – графічні залежності коефіцієнта упору k_P та коефіцієнта моменту опору k_Q гвинта у функції відносного поступу λ та крокового відношення P/D . Але, графічний метод не дозволяє розраховувати режимні показники ПП на маневрених режимах, оскільки і крокове відношення, і поступ гвинтів при цьому безперервно змінюються.

Важлива роль в методах розрахунку режимних показників будь якого пристрою відводиться аналітичним залежностям. Відповідно до цього, в роботі [10] пропонується розраховувати коефіцієнти упору k_P і моменту опору k_Q гвинта в залежності від поступу гвинта λ і крокового відношення P/D за наступними співвідношеннями

$$k_P = 0,0314(P/D)^2 + 0,3417P/D - 0,0706 + 0,05\lambda; \quad (5)$$

$$k_Q = 0,0434(P/D)^2 + 0,025P/D - 0,0179 + 0,005\lambda. \quad (6)$$

де $\lambda = v/Dn$ – поступ гвинта;

D і n – діаметр гвинта та частота його обертання.

На ходовому режимі судна слід враховувати утворення зони розрядження між корпусом судна та струменем води, яка витікає з каналу підрулюючого пристрою. Цей струмінь вступає у взаємодію з потоком води, в якому рухається судно. Взаємодія струменя з потоком води призводить до утворення зони розрядження між корпусом судна та струменем. В результаті, внаслідок ефекту засмоктування, сумарна сила, що діє на судно, та її момент щодо центру тяжіння, зменшуються. Ступінь розвитку цих процесів залежить від співвідношення $m = v/v_s$ між швидкістю руху судна v та швидкістю руху струменя води v_s з каналу ПП.

Відносні величини результуючої поперечної сили $\overline{T_{Th}^0}$, результуючого моменту $\overline{M_{HTh}^0}$ та координат прикладання сили засмоктування $\overline{h_c} = \frac{h_c}{L}$ запропоновано [1] розраховувати за співвідношеннями

$$\overline{T_{Th}^0} = -1,7191m^4 + 1,6259m^3 + 2,3692m^2 - 2,8864m + 1,0373; \quad (7)$$

$$\overline{M_{HTh}^0} = -4,1084m^4 + 6,0548m^3 - 0,3785m^2 - 1,699m + 1,0403; \quad (8)$$

$$\overline{h_c} = 0,461 - 0,408m. \quad (9)$$

Аналітичні залежності (5)-(9) гідродинамічного розрахунку основних режимних показників гвинтів підрулюючих пристроїв вбудовуються в узагальнену математичну модель перехідних режимів пропульсивного комплексу електрохода.

Розроблена математична модель та метод розрахунку поточних значень режимних показників дозволяє всебічно аналізувати поведінку пропульсивних електроходів з підрулюючими пристроями на маневрах. За результатами розрахунку оцінюються основні показники якості всіх складових частин комплексу.

Незважаючи на те, що підрулюючі пристрої призначені частіше за все працювати при малих швидкостях, вони сприяють поліпшенню поворотності судна і при більших швидкостях руху. Саме це і є метою досліджень – оцінка ступеня впливу роботи ПП на показники циркуляційного руху судна та на показники електроенергетичної установки при виході на криволінійну траєкторію. У якості прикладу, що ілюструє вплив роботи ПП на маневрені характеристики електроходів, представлені результати моделювання виходу судна на циркуляцію: а) при повороті лише керма (рис. 1); б) при одночасному повороті кермом та підключенням носового підрулюючого пристрою (рис. 2). Умови виконання маневру:

- частка потужності ПП у потужності ГЕЕУ коефіцієнт – $k_{TR} = 0,17$;
- відносна швидкість руху судна при виході на циркуляцію – $\bar{v} = 0,5$;
- у момент відносного часу $T = 19$ (починається вихід судна на циркуляцію за рахунок: а) перекладання керма на кут 30° (рис. 1); б) перекладання керма на кут 30° з одночасним включенням ПП (рис. 2).

По лівому борту судна на рис. 1 та рис. 2 у характерних точках траєкторії наведено інформацію про поточні значення основних параметрів маневру:

- тривалості пройденого етапу у відносному (T) та абсолютному (t) часі;
- пройденому судном шляху у відносних (довжинах судна) та абсолютних (метрах) одиницях.

До цих точок відносяться:

- точка А1 – початок циркуляції;
- точка А2 – максимальне зміщення ЦТ судна від лінії початкового курсу у бік, зворотний напрямку повороту;
- точка А3 – траєкторія, яка відповідає зміні курсу судна на 90° ;

- точка A4 – траєкторія, що відповідає зміні курсу судна на 180° від початку повороту;
- точка A5 – траєкторія, що відповідає зміні положення ДП судна на двох послідовних курсах, що відрізняються на 180° градусів при усталеному русі.

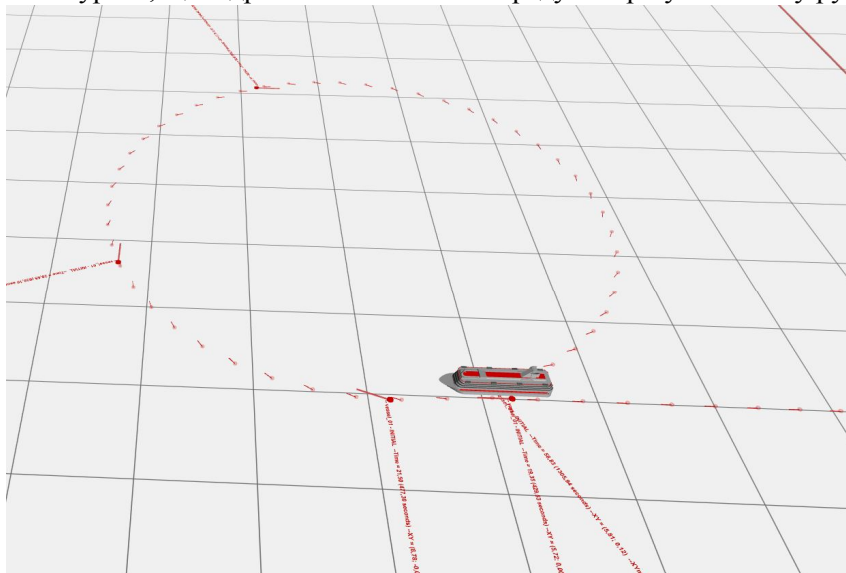


Рис. 1. Траєкторія руху судна при виході на циркуляцію з перекладкою керма на 30°

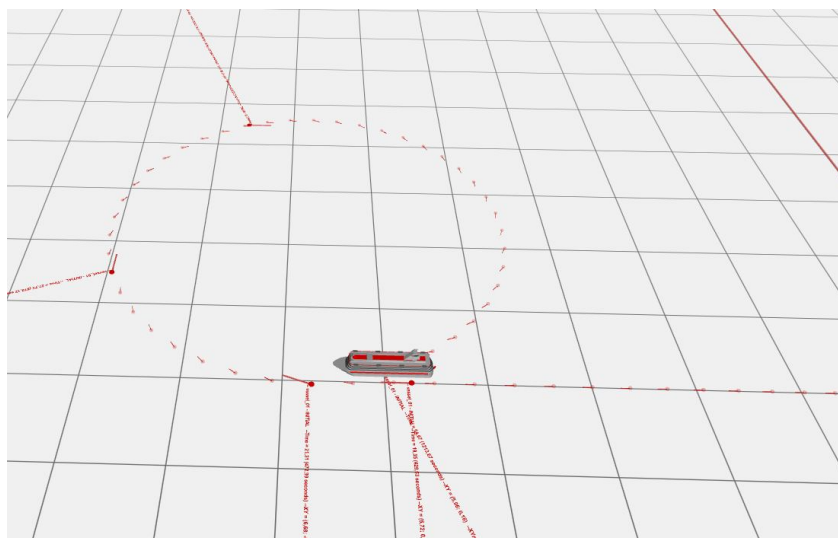


Рис. 2. Траєкторія руху судна при виході на циркуляцію з перекладкою керма на 30° та одночасним включенням ПП

Траєкторії руху наочно ілюструють вплив ПП на параметри циркуляції. Зокрема візуально, діаметр усталеної циркуляції D_C зменшується з 5,4 до 4,5 довжин судна.

Поточні значення основних режимних показників комплексу (для варіанту спільного маневрування кермом та підрулюючими пристроями) показані на рис. 3. Це відносні:

- складові швидкості руху судна v_X , v_Y та кутова швидкість його обертання Ω_Z ;
- кут перекладки керма β_R та кут дрейфу судна β_{dr} ;
- складова сили опору R_X води уздовж осі X ;
- потужність P_D та кутова швидкість обертання ω_D теплових двигунів;
- напруга U_G та струм I_G генераторів;
- напруга U_M , обертовий момент M_M і кутова швидкість обертання ω_M гребних електродвигунів;
- тяга гвинтів T_{Th} підрулюючих пристроїв та струм I_{Th} їх електродвигунів;
- момент M_{Th} та кутова швидкість обертання електродвигунів ПП ω_{Th} .

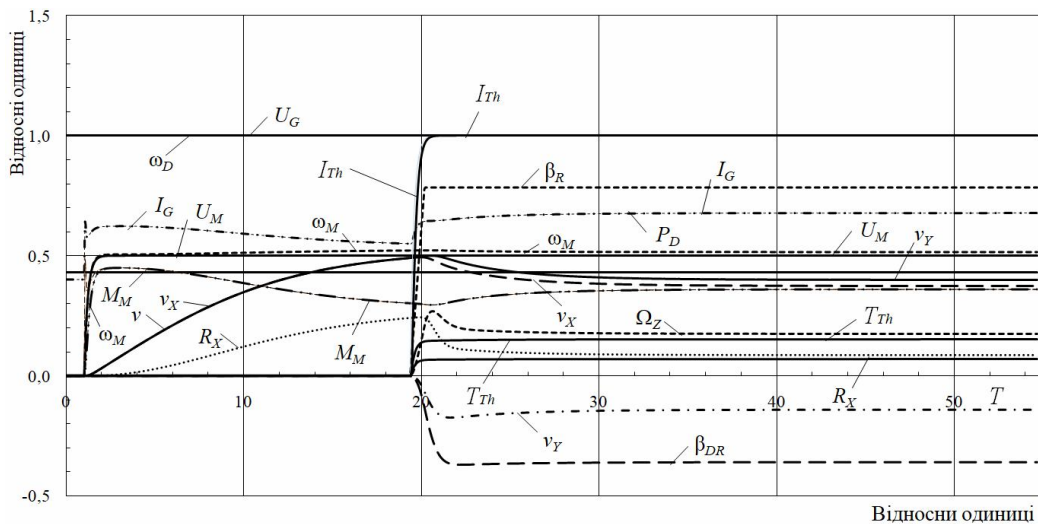


Рис. 3. Поточні значення режимних показників пропульсивного комплексу при сумісному маневруванні кермом та підрулюючими пристроями

Численні розрахунки відповідно до розробленої методики та аналіз літературних джерел показали, що на основні параметри, які характеризують маневреність електроходів при циркуляційному русі, найбільше впливають конструктивні параметри корпусу судна та його електроенергетичної гребної установки [8; 11], частка потужності електродвигунів k_{TR} ПП [10] та початкова швидкість руху судна $v = v_{str}$ при виході на циркуляцію.

Дослідження впливу початкової швидкості v_{str} проведено для судна з середнім значення частки k_{TR} потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв $k_{TR} = 0,17$. Результати розрахунків представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив початкової відносної швидкості судна v_{str}
на показники циркуляційного руху

Малі швидкості руху								
Показники циркуляції	$v_{str} = 0,025$ ($\approx 0,5$ вузлів)		$v_{str} = 0,05$ (≈ 1 вузлів)		$v_{str} = 0,1$ (≈ 2 вузлів)		$v_{str} = 0,15$ (≈ 3 вузлів)	
	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП
X_1, L	3,32	0,07	3,36	0,28	3,39	0,8	3,41	1,37
Y_1, L	1,65	0,52	1,645	0,60	1,64	0,76	1,64	0,78
D_{CT}, L	5,12	0,95	5,11	1,13	5,11	1,49	5,11	1,75
D_C, L	5,0	1,13	5,0	1,14	5,0	1,22	5,0	1,48
v_C, rv	0,025	0,1	0,04	0,09	0,1	0,1	0,13	0,11
$\Delta v, \%$	–	–	–	–	0	0	7	21
Ω_Z, rv	0,015	0,2	0,02	0,18	0,05	0,15	0,07	0,13
T_C, rv	729	119	466	130	245	100	169	89
Середні та великі швидкості руху								
Показники циркуляції	$v_{str} = 0,20$ ($\approx 4,2$ вузлів)		$v_{str} = 0,40$ (≈ 8 вузлів)		$v_{str} = 0,6$ (≈ 12 вузлів)		$v_{str} = 1$ (≈ 21 вузлів)	
	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП	без ПП	з ПП
X_1, L	3,44	1,86	3,52	2,96	3,61	3,34	3,77	3,68
Y_1, L	1,64	0,93	1,64	1,38	1,64	1,52	1,64	1,60
D_{CT}, L	5,11	2,37	5,11	4,10	5,11	4,64	5,11	4,94
D_C, L	5,0	2,05	5,0	3,92	5,0	4,49	5,0	4,8
v_C, rv	0,17	0,14	0,34	0,32	0,49	0,48	0,78	0,77
$\Delta v, \%$	15	30	15	20	18	20	22	25
Ω_Z, rv	0,08	0,15	0,22	0,24	0,3	0,32	0,45	0,45
T_C, rv	130	84	71	63	51	49	38	37,5

Узагальнення результатів розрахунків представлено на рис. 4 та рис. 5 у виді графічних залежностей основних показників циркуляційного руху від початкової швидкості руху судна v_{str} при виході його на циркуляцію. Для незахарашення рисунків та зручності сприйняття інформації ці залежності розбиті на дві групи. На рис. 4 наведено (перша група) залежності (у довжинах судна L): висування судна X_1 ; прямого зміщення Y_1 ; тактичного D_{CT} та усталеного D_C діаметра циркуляції. Індекс « b » відноситься до варіанта управління тільки кермом (базовий варіант), а індекс « a » (альтернативний варіант) до варіанта управління кермом з одночасним підключенням підрулюючих пристроїв.

На рис. 5 наведено залежності (друга група): ступеня зниження швидкості руху судна Δv (у відсотках – %) при виході його на усталену циркуляцію; максимального значення кутової швидкості повороту Ω_Z навколо вертикальної осі Z та тривалості маневру T_C (у відносних одиницях – rv). Індеси «b» та «a» відносяться до тих самих варіантів маневрування.

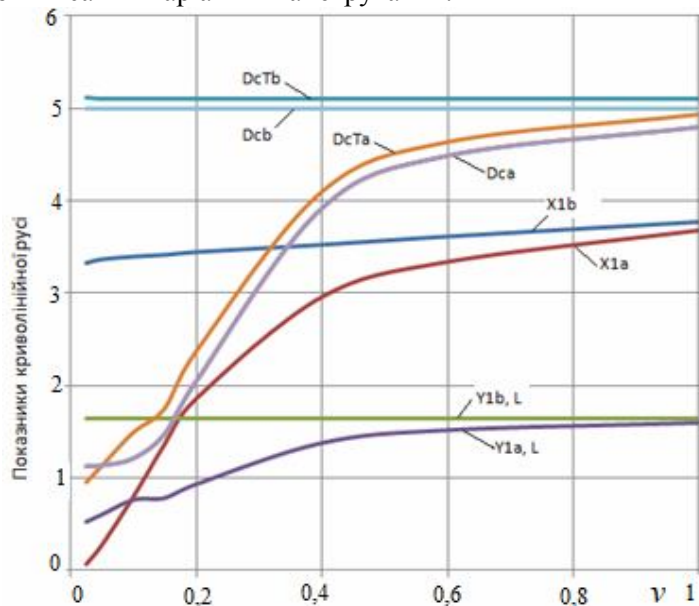


Рис. 4. Залежність показників циркуляції X_1 , Y_1 , D_{CT} та D_C від початкової швидкості руху судна v_{str}

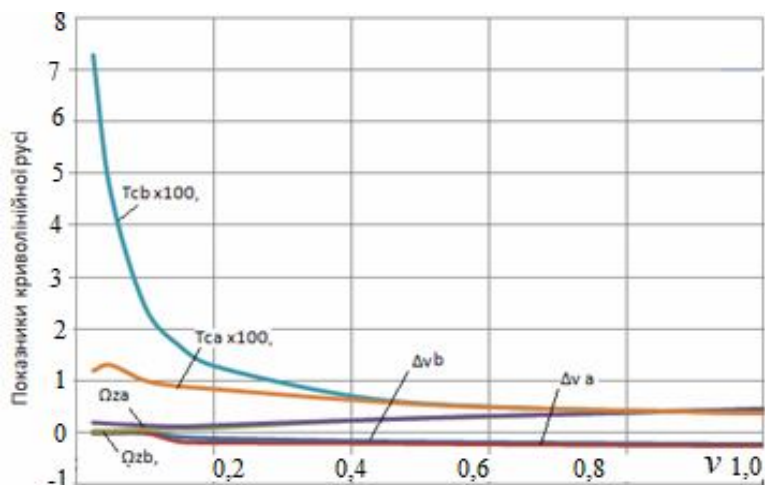


Рис. 5. Залежність показників циркуляції Δv , Ω_Z та T_C від початкової швидкості руху судна v_{str}

Аналіз впливу початкової швидкості руху на показники маневреності свідчить про наступне. Для суден з середніми значення частки k_{TR} потужності, вплив ПП на показники маневреності починає реально позначатися при швидкостях менше $v_{str} < 0,4$ (до 4-5 вузлів). Виходячи з рекомендованих швидкостей руху, при яких застосування ПУ є ефективним, ці результати є очікуваними. Причому, цей вплив нерівнозначний. Зі зниженням швидкості менше $v_{str} < 0,4$, включення ПП призводить до багаторазового зниження висування судна X_1 , тактичного D_{CT} та усталеного D_C діаметру циркуляції. Дуже суттєво зменшується пряме зміщення Y_1 судна, а тривалість циркуляції T_C навпаки – різко зростає. У той же час, на ступінь зниження Δv швидкості (щодо початкового значення v_{str}) з виходом на усталений етап циркуляції і на кутову швидкість Ω_Z обертання судна навколо осі Z підключення підрулюючих пристроїв практично не впливає.

При моделюванні виходу суден на циркуляцію оцінювалися й поточні значення та показники якості роботи гребної електроенергетичної установки. Як показали розрахунки, на швидкостях руху, при яких використовувалися підрулюючі пристрої, потужність пропульсивних гребних електродвигунів не перевищувала допустимого значення. З урахуванням часток потужностей пропульсивних гребних електродвигунів, електродвигунів ПП та загально-суднових споживачів електроенергії у загальній потужності суднової електроенергетичної системи, зміни у сумарному навантаженні на суднову електростанцію були невеликими. Тому, режимні показники електроенергетичної системи не виходили (див. рис. 3) за допустимі межі. Відповідно до цього, детальний аналіз впливу роботи підрулюючих пристроїв на ці показники не проводився і у табл. 1 та на рис. 4 й рис. 5 це не знайшло відповідного відображення.

Висновки.

1. Розроблено метод розрахунку режимних показників пропульсивних комплексів електроходів з підрулюючими пристроями при маневруванні. Основне призначення методу – оцінка маневрених характеристик суден з системами активного управління рухом. Особливістю методу є те, що процеси в підрулюючих пристроях пропульсивних комплексів електроходів представлені з урахуванням гідродинамічних процесів взаємодії гвинтів ПП з корпусом судна та ефекту засмоктування при взаємодії струменя води, який витікає з каналу ПП з потоком води, що натікає на струмінь при русі судна.

2. Математична модель та метод дослідження дають можливість оцінювати маневрені властивості електроходів з підрулюючими пристроями з одночасним контролем навантаження на основні силові елементи єдиної суднової електроенергетичної установки. Проілюстровано можливості підрулюючих пристроїв щодо поліпшення маневрених характеристики суден.

3. Знайдено вплив на показники маневреності швидкості виходу судна на циркуляційний рух. Показано, що істотний вплив підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики електроходів проявляється на невеликих швидкостях руху. Причому, при наближенні до швидкості $v = 0,15$ починає позначатися ефект засмоктування, який знижує позитивну дію гвинтів ПП. Навантаження на суднову електроенергетичну систему не виходять за допустимі межі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юкунь Фен, Цзоган Чен, Ї Дай, Ляньчжен Цуй, Чжен Чжан, Пінг Ван. Багатоцільова оптимізація носового підрулювача на основі чисельного моделювання URANS. *Ocean Engineering*, 2022, том. 247(4):110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
2. Юкунь Фен, Цзоган Чен, Ї Дай, Пінг Ван. Експериментальне та чисельне дослідження гідродинамічних характеристик носового підрулюючого пристрою. *Ocean Engineering*, 2020, том. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107348.
3. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. Експериментальне дослідження вибраних аспектів поля потоку, створеного носовим підрулюючим двигуном, в умовах нульової швидкості судна. *Ocean Engineering*, 2020, том. 209(92):107463. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.
4. Лю Хуей, Фен Юкунь, Чень Цзоган, Дай І, Тянь Сімін. Чисельне дослідження коливань тиску для носового підрулювача. *Журнал Шанхайського університету Цзяотун*, вип. 51(3), С. 294-299. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2017.03.007.
5. Йонут Крістіан Скурту, Валентин Ончіка. Комбіноване CFX і структурне моделювання для навантаження носових підрулювачів в умовах експлуатації. *Серія конференцій Journal of Physics*, вип. 1122 (1): 012024. doi: 10.1088/1742-6596/1122/1/012024.
6. Kupraty O. Mathematical modelling збудування вантажівки тормозної системи, використовуючи індивідуальний товстої точці роботи і дослідження товстої стрілки контроль конкретних. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, June 2021, С. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
7. Рут, Е. Управління рухом і розподіл тяги на морських судах. доктор філософії Дисертація, NTNU Норвезький університет науки і технологій, Тронхейм, Норвегія, 2008.
8. Яровенко В.А., Черніков П.С. (2017). Методика розрахунку перехідних режимів суднових електродвигунів. *Електротехніка та електромеханіка*, (6), С. 32-41. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05>

9. Яровенко В.А., Черніков П.С., Зарицька Є.І., Шумило А.Н. (2020). Управління електродвигунами суден під час руху по криволінійній траєкторії. Електротехніка та електромеханіка, (5), С. 58-65. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.09>
10. Яровенко В.О., Черніков Х.С., Шумило Я.М., Зарінська О.І. Математична модель перехідних режимів електричних суднових силових установок з двигунами. Розвиток транспорту – Одеса, ОНМУ, 2022 – № 3(14). С.110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09>
11. Яровенко В.А. Динаміка рухових електросилових установок рухових комплексів електросуден Розвиток наукових шкіл Одеського національного морського університету: колективна монографія. Рига : Izdevnieciba «Baltija Publishing». 2020. 500 с <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.08>
12. Шумило Я.М., Яровенко В.О., Зарінська О.І. Динамічна подібність рушійних комплексів суден. Розвиток транспорту – Одеса: ОНМУ, 2022 – № 4(15). Р. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05>
13. Олександр Шумило, Володимир Яровенко, Микола Малаксіян, Олексій Мельник (2003). Комплексна оцінка впливу геометрії корпусу модернізованого судна на маневрені характеристики та параметри пропульсивної системи, Науковий журнал морських досліджень (Поморство), том 37 (2023) С. 314-325. https://www.pfri.uniri.hr/web/en/dokumenti/pomorstvo/2023/12/13_768-Shumylo.et.al.pdf
14. Шумило О., Яровенко В., Малаксіано М., Мельник О., Іовчев С. (2025). Методика оцінки маневреності та показників безпеки електросуден на основі теорії динамічної подібності. Дослідження систем, прийняття рішень і керування (том 580, С. 235-255). Спрингер. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_15

REFERENCES

1. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. (2022). Multi-objective optimization of a bow thruster based on URANS numerical simulations. Ocean Engineering, 2022, vol. 247(4): 110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
2. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Ping Wang. (2020). An experimental and numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the bow thruster. Ocean Engineering, 2020, vol. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107348.
3. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. (2020). Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. Ocean Engineering, 2020, vol. 209(92):107463. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.

4. Liu Hui, Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Tian Ximin. (2017). Numerical Study of Pressure Fluctuation for Bow Thruster. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, vol. 51(3), P. 294-299. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu. 2017. 03.007.
5. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. (2018). Combined CFX and Structural Simulation for Bow Thrusters Loading under Operating Conditions. *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1122(1):012024. doi: 10.1088/1742-6596/1122/1/012024.
6. Kupraty O. (2021). Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, June 2021, P. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
7. Ruth E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
8. Yarovenko V.A., & Chernikov P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), P. 32-41. [https://doi.org/ 10.20998/ 2074-272X.2017.6.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05) [in Ukrainian].
9. Yarovenko V.A., Chernikov P.S., Zaritskaya E.I., & Schumylo A.N. (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), P. 58-65. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.09> [in Ukrainian].
10. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zarinska O.I. (2022). Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 3(14). C.110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09>.
11. Yarovenko V.A. (2020). Dynamics of propelling telelectric power plants of electric ships' propulsive complexes Development of Scientific Schols of Odessa National Maritime University: collective monograph. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». 2020. 500 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.08>
12. Schumylo J.M., Yarovenko V.O., Zarinska O.I. (2022). Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 4 (15). C. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05> [in Ukrainian].
13. Oleksandr Shumylo, Volodymyr Yarovenko, Mykola Malaksianj, Oleksiy Melnyk (2023). Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters, *Scientific Journal of Maritime Research (Pomorstvo)*, Vol 37 (2023) P. 314-325. https://www.pfri.uniri.hr/web/en/dokumenti/pomorstvo/2023/12/13_768-Shumylo.et.al.pdf . [in Ukrainian].

14. Shumylo O., Yarovenko V., Malaksiano M., Melnyk O., & Iovchev S. (2025). Methods for assessing electric ships' maneuvering and safety indicators based on the theory of the dynamic similarity. In Studies in Systems, Decision and Control (Vol. 580, P. 235-255). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_15 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 12.12.2024

Посилання на статтю: Шумило О.М., Яровенко В.О., Малаксіано М.О., Зарицька О.І. Вплив підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики електроходів при їх циркуляційній русі // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2025. № 2 (76). С. 47-63. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-47-63.

Article received 12.12.2024

Reference a journal artic: Schumylo O., Yarovenko V., Malaksiano M., Zaritska O. Influence of thrusters on the electric ships' maneuvering characteristics during their circulation run // *Herald of the Odesa National Maritime University: Coll. scient. works*, 2025. № 2 (76). P. 47-63. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-47-63.