

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-81-99

ВПЛИВ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА МАНЕВРЕНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОХОДІВ

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»

С.І. Иовчев

к.ф-м.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Метою дослідження є розробка методу оцінки впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики електроходів.

У електроходів потужність електродвигунів підрулюючих пристроїв співмірна з потужністю пропульсивних гребних електродвигунів. На маневрених режимах всі складові частини суднової електроенергетичної системи безперервно працюють на перехідних режимах. Аналіз впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневрені властивості електроходів повинен проводитися з урахуванням сумісної роботи всіх складових частин єдиного суднового пропульсивного комплексу.

Метод оцінки побудовано на базі математичної моделі перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів. В основу розрахунку гідродинамічних характеристик гвинтів підрулюючих пристроїв закладено аналітичний метод, який дозволяє враховувати процеси їх взаємодії з корпусом судна на неусталених режимах.

Метод розрахунку перехідних режимів дозволяє оцінювати основні показники якості маневрування з одночасним контролем додаткових навантажень на всі складові частини єдиної суднової електроенергетичної системи. За результатами дослідження показано, що при збільшенні потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв маневрені характеристики суден покращуються. Електроенергетична система не перевантажується. Ступінь впливу потужності електродвигунів на показники маневреності пропульсивних комплексів залежить від швидкості виходу судна на криволінійну траєкторію.

© Шумило О.М., Яровенко В.О., Малаксіано М.О., Иовчев С.І., 2025

Знайдено закономірності впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на показники маневреності електроходів.

Сформовано пропозиції щодо обґрунтованого вибору потужності підрулюючих пристроїв та прогнозуванням маневрених властивостей суден з урахуванням спроможностей електроенергетичної установки щодо їх забезпечення.

Ключові слова: електрохід, пропульсивний комплекс, суднова електроенергетична система, гребна установка, електродвигуни підрулюючих пристроїв, аналітичний метод розрахунку, моделювання перехідних режимів, вплив потужності електродвигунів на показники маневреності.

UDC 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-81-99

INFLUENCE OF THRUSTERS' ELECTRIC MOTORS POWER ON THE MANEUVERING PROPERTIES OF ELECTRIC SHIPS

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»

S. Iovchev

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

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The aim of the study is to develop a method for assessing the impact of the thrusters' electric motors power on electric ships' maneuvering characteristics.*

The power of the thrusters' electric motors on electric ships is comparable with the power of propulsion electric motors. In maneuvering modes, all components of the ship's electric power system constantly operate in transient modes. Analysis of the impact of the thrusters' electric motors power on the electric ships' maneuvering properties should be carried out taking into account the joint operation of all components of a single propulsion ship complex.

The assessment method is based on a mathematical model of transient modes of propulsion systems. The calculation of the hydrodynamic characteristics of thrusters' propellers is based on an analytical method that allows taking into account the processes of their interaction with the ship's hull in unspecified modes. The method for calculating transient modes makes it possible to assess the main indicators of maneuvering quality with simultaneous monitoring of additional loads on all components of the single ship's electric power system. The results of the study show that with an increase in the power of

the thrusters' electric motors, the maneuverability of ships improves. The electric power system is not overloaded. The degree of influence of the electric motors power on the maneuverability indicators of propulsion systems depends on the speed of the vessel's exit to a curved trajectory. Regularities in the influence of the power of the thrusters' electric motors on the maneuverability indicators of electric ships are found. Proposals are formulated for a justified choice of the power of thrusters and forecasting the maneuverability of ships taking into account the capabilities of the electric power plant to ensure them. Bibl. 14, Table 1, Fig. 7.

Keywords: *electric ship, propulsion complex, ship electric power system, propulsion plant, thrusters' electric motors, analytical calculation method, modeling of transient modes, influence of electric motors power on maneuverability indicators.*

Актуальність. Основним пристроєм управління рухом судна при маневруванні є стерно. Але стерно ефективно лише при суттєвій швидкості руху. У певних умовах маневрування (обмежена акваторія, стислий фарватер, швартови, тощо) розвинути швидкість, достатню для ефективного управління судном, неможливо. Для забезпечення керованості суден на малому ходу та без ходу використовують підрулюючі пристрої (ПП). Підрулюючі пристрої створюють додаткову бічну тягу при скільки завгодно малій швидкості судна та спотворюють тим самим можливість ефективного виконання маневрених операцій.

Маневрені властивості суден безпосередньо залежать від потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв. Її має бути достатньо для забезпечення необхідного значення тяги гвинтів в залежності від очікуваного ступеню маневреності. Навіть для суден з помірним ступенем маневреності, частка потужності (коефіцієнт k_{TR}) електродвигунів ПП відносно потужності гребної електроенергетичної установки (ГЕЕУ) доходить до $k_{TR} = 0,24$ [1]. Відповідно до цього, потужність електродвигунів підрулюючих пристроїв може змінюватись від декількох сотень кіловат до 5000 кВт. Таким чином, підрулюючий пристрій – один з найбільш потужних споживачів електроенергії на судні. Його робота суттєво впливає і на роботу судових генераторних агрегатів, і на якість електроенергії судової мережі. Відповідно до цього, при проектуванні та в процесі експлуатації електроходів неминуче встає важлива задача – домогтись необхідних маневрених властивостей судна, забезпечивши при цьому належний режим роботи і самих підрулюючих пристроїв, і пропульсивної гребної електричної установки, і судових джерел електроенергії, і загальносудових споживачів. Розв'язання цієї задачі можливе за результатами моделювання маневрених режимів роботи електроходів з підрулюючими пристроями.

Стан питання. Робота підрулюючих пристроїв при маневруванні суден розглянута у численних дослідженнях. Але здебільшого, всі вони спрямовані на вирішення конкретних прикладних завдань, які відносяться або до удосконалення конструкції ПП, або до аналізу керованості судна як металевої конструкції, на яку діють різні зовнішні фактори збурення. Зокрема, в роботах [2-5] приведені результати експериментального і чисельного дослідження гідродинамічних характеристик ПП і вплив на ефективність носових підрулюючих пристроїв (НПП) саме конструктивних особливостей механізму ПП. Моделюванню навантаження на НПП в

умовах експлуатації присвячена робота [6], а у статті [7] пропонується метод побудови траєкторії розвороту судна за допомогою пристрою управління. В роботі [8] досліджуються проблеми розподілу тяги в гребній електричній установці, до складу якої входять гребні електродвигуни (ГЕД) та тунельні або азимутальні підрулюючі пристрої при їх взаємодії.

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити наступні висновки. Основними їх завданнями була оцінка маневрених якостей суден. При цьому розв'язуються лише задачі управління рухом судна. Розглядаються питання удосконалення конструктивних параметрів ПП, створення програмного забезпечення тренажерів, на яких мають відпрацьовуватися прийоми управління рухом судна. Автори, на жаль, не звертають увагу на роботу гребної електроенергетичної установки, уникають питань взаємодії рушіїв з корпусом судна. Вважається, що гребні електродвигуни і гвинти працюють у сталому режимі, на малому ході. Тим самим корпус судна відокремлюється від єдиного суднового пропульсивного комплексу. При цьому, цілком природно, виникає питання – а чи спроможний судновий пропульсивний комплекс забезпечити виконання запланованого маневру? Якими будуть навантаження на електроенергетичну систему, та чи не спрацює при цьому система захисту?

Відповіді на ці питання можуть бути отриманими лише за результатами обґрунтованого аналізу маневрених режимів роботи електроходів на базі системного підходу. Гребна електроенергетична установка з підрулюючими пристроями повинна розглядатися сумісно з усіма складовими частинами єдиного суднового пропульсивного комплексу. Побудова математичної моделі та методу дослідження впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики електроходів й на навантаження в судновій електроенергетичній системі є метою даної роботи.

Метод розв'язання задачі. В основу аналізу маневрених характеристик пропульсивних комплексів електроходів з ПП пропонується покласти математичну модель перехідних режимів роботи комплексу з єдиною судновою електроенергетичною установкою, яка представлена в роботах [9; 10]. Модель побудовано на базі структурної схеми комплексу, укрупнений варіант якої надано на рис. 1.

До складу пропульсивного комплексу входять:

Генераторні агрегати *GENERATOR SET*. Кожний агрегат має: тепловий двигун *D*; регулятор частоти обертання *DR*; синхронний генератор *G*; регулятор напруги *GR*.

Пропульсивні силові контури *RIGHT CONTOR (R)* й *LEFT CONTOR (L)*. До складу кожного контуру входять: перетворювач частоти *SE*; частотно-керований гребний електродвигун *M*; система регулювання *SER* перетворювачем *SE*; гребний гвинт *P*.

Електроприводи носових (*B*) та кормових (*A*) підрулюючих пристроїв з перетворювачами напруги (*SEB*, *SEA*), асинхронними короткозамкненими електродвигунами (*MThB*, *MThA*), гребними гвинтами *ThB* і *ThA*.

Система управління *CONTROL SYSTEM*.

Стерно – *R*.

Корпус судна – *HULL*.

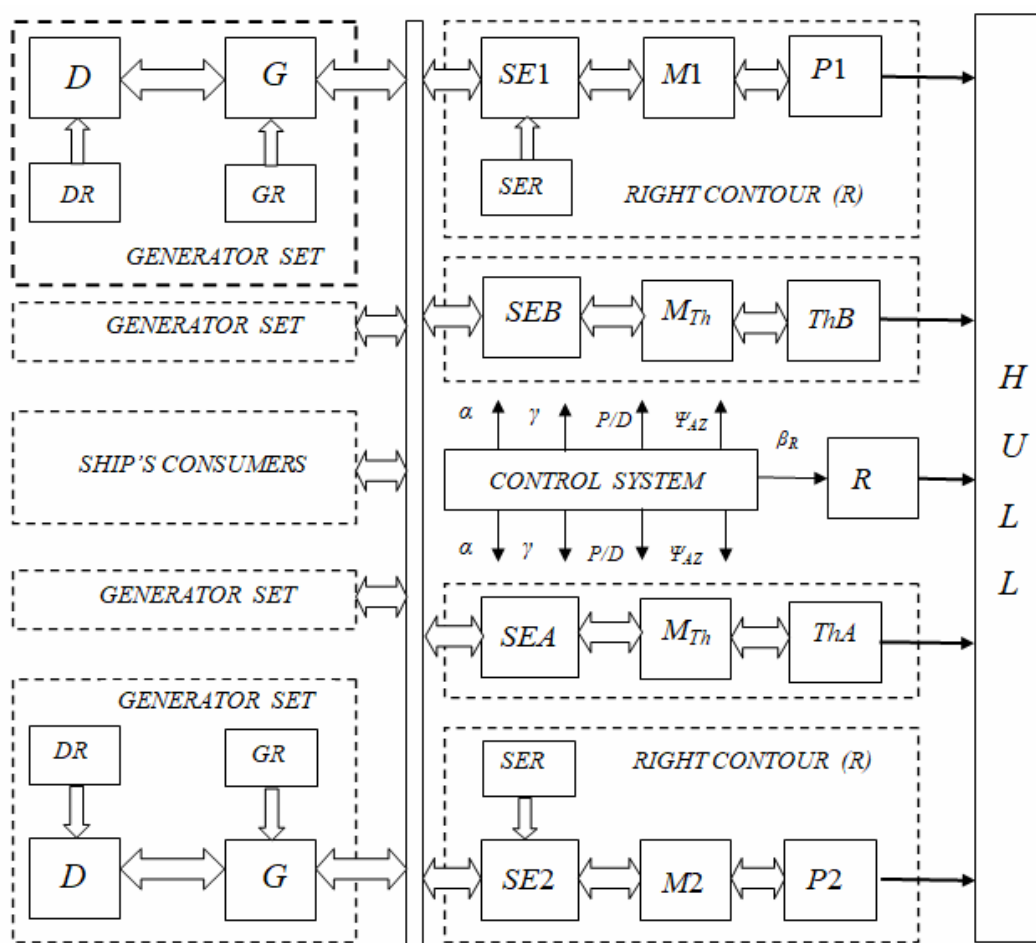


Рис. 1. Укрупнена структурна схема пропульсивного комплексу

Сучасні електроходи – це, як правило, судна з єдиною судною електроенергетичною системою. Тому, до пропульсивного комплексу необхідно додати й загально-суднові споживачі електроенергії *SHIP'S CONSUMERS*.

Система управління гребною установкою формує сигнали управління:

- перетворювачами частоти пропульсивних гребних електродвигунів по частоті α_{Set1} , α_{Set2} та по напрузі – γ_1 , γ_2 ;
- перетворювачами напруги γ_{ThB} , γ_{ThA} для плавного пуску електродвигунів ПП;
- кроковим відношенням P/D гвинтів підрулюючих пристроїв;
- кутом перекладки керма β_R .

Повний опис перехідних процесів в пропульсивному комплексі, з обґрунтуванням прийнятих при цьому припущень, та методика розрахунку безрозмірних параметрів і критеріїв подібності комплексу (отриманих в процесі побудови моделі) наведено у [1; 9].

У якості гвинтів в підрулюючих пристроях частіше за все використовують гвинти регульованого кроку (ГРК). Саме вони сприяють підвищенню маневреності суден. В таких ПП управління тягою гвинта здійснюється за рахунок зміни відносного кроку гвинта, а частота його обертання залишається постійною на рівні статизму механічної характеристики приводного асинхронного електродвигуна. Відповідно до цього, система управління приводом підрулюючого пристрою призначена для того, щоб забезпечити контрольований плавний пуск електродвигуна та вихід його на природну механічну характеристику. У якості перетворювача електроенергії в таких приводах використовують перетворювачі напруги в режимі керованого пуску. Математичний опис процесів в силових контурах з носовими та кормовими підрулюючими пристроями надано в роботах [12; 13]. Цей опис введено до складу математичної моделі перехідних режимів роботи пропульсивного комплексу.

У процесі досліджень впливу роботи підрулюючих пристроїв на маневрені властивості електроходів неминуче встає питання щодо визначення необхідної тяги гвинтів ПП. На її величину напряму впливає потужність приводних електродвигунів. Саме це і є основною ціллю дослідження: виявлення впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв – впливу частки потужності (коефіцієнту k_{TR}) електродвигунів ПП відносно потужності гребної електроенергетичної установки (ГЕЕУ) – на маневреність суден з одночасним контролем здатності його електроенергетичної установки виконати поставлене завдання зі збереженням працездатності всієї суднової електроенергетичної системи.

Гребні гвинти підрулюючих пристроїв працюють у дуже складних умовах. Як і будь-який судновий рушій, вони вступають у взаємодію з навколишнім середовищем, зі стінками каналу, з частинами самого ПП. На роботу реального підрулюючого пристрою впливають в'язкісні втрати і в'язкісна взаємодія, конфігурація каналу і багато іншого. Тому, урахування гідродинамічних процесів взаємодії гвинтів ПП з корпусом судна, з судною електроенергетичною установкою є обов'язковим.

В основу гідродинамічного розрахунку роботи гвинтів підрулюючих пристроїв закладено відомий метод Гофмана. Метод базується на основі діаграм серійних випробувань гребних гвинтів у тонкій циліндричній трубі.

Основні вихідні режимні показники ПП:

– упор P_{Th} та тяга T_{Th} гвинтів

$$P_{Th} = k_{TP} D^4 n^2; \quad (1)$$

$$T_{Th} = P_{Th} (1 + t), \quad (2)$$

де t – коефіцієнт засмоктування.

$$M_{Th} = \frac{9550 \left(k_Q 2 \pi D^5 n^3 \right)}{n}. \quad (3)$$

Графічні залежності коефіцієнта упору k_P та коефіцієнта моменту опору k_Q гвинта у функції відносного поступу λ та крокового відношення P/D були отримані іншими авторами за результатами опробувань гребних гвинтів у дослідницьких басейнах. Вони надані також і в роботі [1] у виді серійних діаграм випробувань гребних гвинтів у циліндричній трубі. Діаграми можуть бути успішно використані для розрахунку основних характеристик гвинтів підрулюючих пристроїв при розрахунку їх параметрів та робочих параметрів на ustalених режимах роботи.

Однак, графічний метод не дозволяє розраховувати роботу підрулюючих пристроїв на маневрених режимах, оскільки і крокове відношення, і поступ гвинтів при цьому безперервно змінюються. У подібних випадках, важлива роль в процедурах розрахунку основних режимних показників відводиться аналітичним залежностям. Вони дають можливість розрахунку поточних значень основних режимних показників гвинтів при змінюваних у часі і крокового відношення, і поступу гвинта. В роботі [1] пропонується розраховувати коефіцієнти упору k_P і моменту опору k_Q гвинта ПП в залежності від поступу гвинта λ і крокового відношення P/D за наступними співвідношеннями

$$k_P = 0,0314(P/D)^2 + 0,3417P/D - 0,0706 + 0,05\lambda; \quad (4)$$

$$k_Q = 0,0434(P/D)^2 + 0,025P/D - 0,0179 + 0,005\lambda. \quad (5)$$

Поступ гвинта

$$\lambda = v/Dn,$$

де D і n – діаметр гвинта та частота його обертання.

При роботі гребного гвинта в тонкій циліндричній трубі у швартовному режимі відносний його поступ за швидкістю протікання води $\lambda_s = v_s/Dn$ залежить тільки від крокового відношення P/D , й може бути представленим лінійним рівнянням

$$\lambda_s = 0,3015 \cdot P/D. \quad (6)$$

Коефіцієнт навантаження гвинта за швидкістю протікання потоку води

$$\sigma_{Ps} = 2T / \rho v_s^2 A_0, \quad (7)$$

де A_0 – площа диска гребного гвинта;

v_s – швидкість протікання води через рушій.

При роботі підрулюючого пристрою на ходовому режимі судна слід враховувати ще одне явище – утворення зони розрядження між корпусом судна та струменем води, яка витікає з каналу ПП зі швидкістю v_s . Струмінь вступає у взаємодію з потоком води, в якому рухається судно зі швидкістю v . Взаємодія струменя з потоком води, призводить до утворення зони розрядження між корпусом судна та струменем. В результаті з'являється сила засмоктування ΔT_{Th} , яка спрямована убік, протилежний дії тяги гвинта T_{Th} , та прикладена в області між ПП і міделем судна. В результаті сумарна сила, що діє на судно, та її момент щодо центру тяжіння, зменшуються. Ступінь розвитку цих процесів залежить від співвідношення між v та v_s – від параметра $m = v / v_s$.

Негативний вплив сили засмокування проявляється на малих швидкостях руху. При цьому тяга гвинтів ПП падає до 30 %-40 %, а момент від цієї сили – до 50 % відносно відповідних значень при $v = 0$. В роботі [1] запропоновано аналітичні залежності для відносної величини результуючої поперечної сили $\overline{T_{Th}^0}$ та відносного результуючого моменту $\overline{M_{HTh}^0}$

Співвідношення (1)-(7) щодо гідродинамічного розрахунку основних режимних показників гвинтів підрулюючих пристроїв вбудовуються в узагальнену математичну модель перехідних режимів пропульсивного комплексу електрохода [1; 11; 14]. Після цього, в математичній моделі руху судна [1; 9; 13] у зв'язанню з ним системі координат $GXYZ$ з'являються сили та моменти сил, які діють на корпус судна з боку підрулюючих пристроїв.

Складові швидкості руху вздовж осей X , Y і швидкість повороту навколо осі Z набудуть наступного вигляду:

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y} \overline{\Omega_Z} + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} \overline{P_{ej}} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v^2} - \overline{R_X} \right\}; \quad (8)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X} \overline{\Omega_Z} + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_j K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P_{ej}} + C_{RY} \beta_{RP} \overline{v^2} \pm \sum_h k_h \overline{P_{Thh}} - \overline{R_Y} \right\}; \quad (9)$$

$$\frac{d\overline{\Omega_Z}}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X} \overline{v_Y} + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P_{ej}} + C_{RY} \overline{X_R} \beta_{RP} \overline{v^2} \pm \sum_h k_h \overline{P_{Thh}} h_h + \right. \\ \left. + (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) \right\}; \quad (10)$$

де T – відносний (безрозмірний) час

$$T = \frac{v_0}{L} t,$$

де v_0 – швидкість судна; L – довжина судна; t – поточний час.

$\overline{R_X}$ – 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;

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

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

пристроїв, щодо центру тяжіння судна;

N_X, N_Ω – критерії динамічної подібності [1];

h_h – координата прикладання тяги гвинта T_{Th} та її відносна величина

$$\overline{h_h} = h_h / L;$$

X_R – відстань від центру системи координат до стерна;

P_{ej} та K_{Pj} – корисний упор гребного гвинта та його частка у сумарному упорі відповідно;

β_{dr} – кут дрейфу судна;

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

β_{RP} – кут атаки стерна.

Коефіцієнти $C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$, $C_{\lambda 2}$, C_{RX} , C_{RY} , – безрозмірні параметри пропульсивного комплексу [1; 9], які безпосередньо визначають основні показники маневреності електроходів, та впливають на показники роботи гребної електроенергетичної установки.

Математична модель та розроблений на її основі метод імітаційного моделювання перехідних режимів роботи [11; 13] дозволяють розраховувати поточні, по ходу виконання маневрів, значення основних режимних показників складових частин пропульсивного комплексу та показники якості виконання маневрених операцій:

- складових швидкості руху судна v_X , v_Y та кутової швидкості його обертання Ω_Z навколо осі Z ;
- кута перекладки стерна β_R та кута дрейфу судна β_{dr} ;
- складової R_X сили опору води уздовж осі X ;
- потужності P_D та кутової швидкості обертання ω_D теплових двигунів;
- напруги U_G та струму I_G генераторів;
- напруги U_M , обертового моменту M_M і кутової швидкості обертання ω_M гребних електродвигунів;
- тяги гвинтів T_{Th} та струму I_{Th} електродвигунів підрулюючих пристроїв;
- крутного моменту M_{Th} та кутової швидкості обертання ω_{Th} електродвигунів підрулюючих пристроїв;
- потужності P_D та кутової швидкості обертання ω_D теплових двигунів.

У роботах [1; 10], у якості прикладу, представлені результати моделювання процесів виходу судна на циркуляцію при управлінні стерном з одночасним включенням носового підрулюючого пристрою – траєкторії руху суден та поточні значення основних режимних показників пропульсивного комплексу по ходу виконання маневрів.

Результати досліджень. Аналіз впливу частки потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв k_{TR} на маневрені характеристики електроходів проведено для трьох варіантів k_{TR} – для суден зі «слабкою» ($k_{TR} = 0,08$), середньою ($k_{TR} = 0,17$) та «високою» ($k_{TR} = 0,25$) ступенями маневреності. Ступінь впливу k_{TR} проаналізовано для декількох значень швидкості v_{str} виходу судна на циркуляцію.

Відповідно до Стандартів маневреності суден, основними показниками маневру циркуляції, який виконується поворотом керма на 35° або максимально допустимий кут повороту на тестовій швидкості, є:

- 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° .

Для повноти оцінки маневру до цих показників додано:

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

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

- кутову швидкість обертання судна навколо вертикальної осі Z – Ω_Z ;

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

- тривалість маневру T_C .

Якісне виконання маневру залежить від можливостей суднової електроенергетичної установки (СЕЕУ) та перевантажувальних здібностей її складових частин. Тому, до показників циркуляції додані коливання:

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

- крутного моменту ΔM_M й струму ΔI_M гребних електродвигунів;

- потужності теплових двигунів генераторних агрегатів – ΔP_D .

Ці показники СЕЕУ мають певні обмеження на допустимий діапазон зміни їх значень. Тому у процесі маневрування їх необхідно контролювати.

Результати досліджень впливу частки потужності k_{TR} електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики пропульсивних комплексів електроходів при різних швидкостях v_{str} виходу судна на циркуляцію наведено у табл. 1

Узагальнення результатів розрахунків представлено на рис. 2-7. Це – графічні залежності висування електроходу X_1 , прямого зміщення Y_1 , тактичного D_{CT} та усталеного D_C діаметра циркуляції, кутової швидкості обертання Ω_Z , й тривалості циркуляції T_C від частки k_{TR} потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв. Залежності X_1 , Y_1 , D_{CT} і D_C надані у довжинах судна L , а залежності v_C , Ω_Z , та T_C – у відносних одиницях rv ,

Таблиця 1

Вплив частки потужності k_{TR} електродвигунів підрулюючих пристроїв
на показники пропульсивного комплексу при різних швидкостях руху судна v_{str}

Вплив частки потужності k_{TR} при малих швидкостях руху v_{str}									
Показники циркуляції	$v_{str} = 0,05$			$v_{str} = 0,1$			$v_{str} = 0,15$		
	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25
X_1, L	0,45	0,28	0,22	1,26	0,80	0,62	1,96	1,37	1,11
Y_1, L	0,69	0,60	0,57	0,77	0,76	0,74	0,99	0,78	0,75
D_{CT}, L	1,31	1,13	1,06	1,70	1,49	1,41	2,60	1,75	1,54
D_C, L	1,14	1,14	1,14	1,45	1,22	1,15	2,31	1,48	1,32
v_C, rv	0,06	0,09	0,11	0,07	0,1	0,12	0,11	0,11	0,12
$\Delta v, \%$	—	—	—	—	—	—	27	27	20
Ω_Z, rv	0,11	0,18	0,23	0,1	0,15	0,19	0,11	0,13	0,17
T_C, rv	150	130	123	123	100	92	114	89	80
Вплив частки потужності k_{TR} при середніх швидкостях руху v_{str}									
Показники циркуляції	$v_{str} = 0,30$			$v_{str} = 0,45$			$v_{str} = 0,60$		
	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25
X_1, L	2,99	2,99	2,99	3,23	3,16	3,11	3,48	3,34	3,23
Y_1, L	1,41	1,41	1,41	1,50	1,46	1,44	1,58	1,52	1,46
D_{CT}, L	4,24	4,24	4,24	4,31	4,44	4,24	4,88	4,64	4,23
D_C, L	4,08	4,08	4,08	4,41	4,29	4,18	4,75	4,49	4,27
v_C, rv	0,24	0,24	0,24	0,36	0,36	0,36	0,49	0,48	0,47
$\Delta v, \%$	20	20	20	19	19	21	18	20	22
Ω_Z, rv	0,17	0,17	0,17	0,23	0,24	0,23	0,3	0,3	0,3
T_C, rv	82	82	82	66	65	65	50	49	48

Вплив частки потужності k_{TR} на висування X_1 та пряме зміщення Y_1 електрохода проілюстровано на рис. 2 та рис. 3.

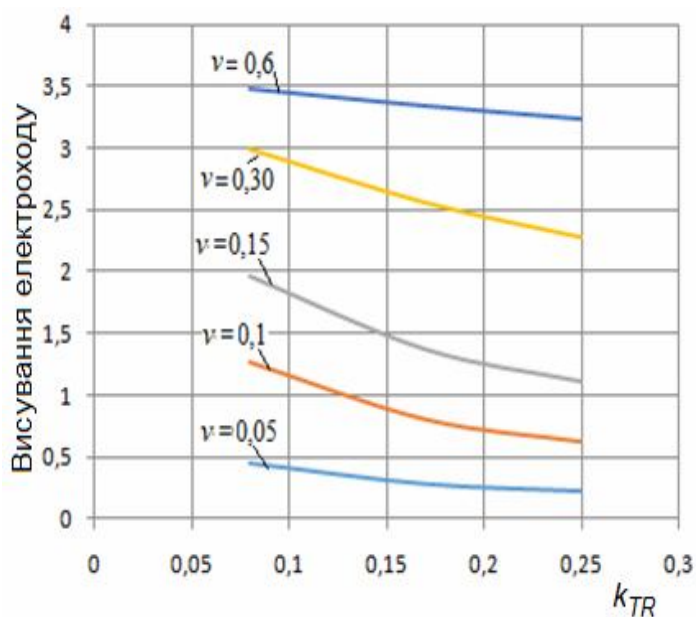


Рис. 2. Вплив k_{TR} на висування електроходу при різних швидкості руху v

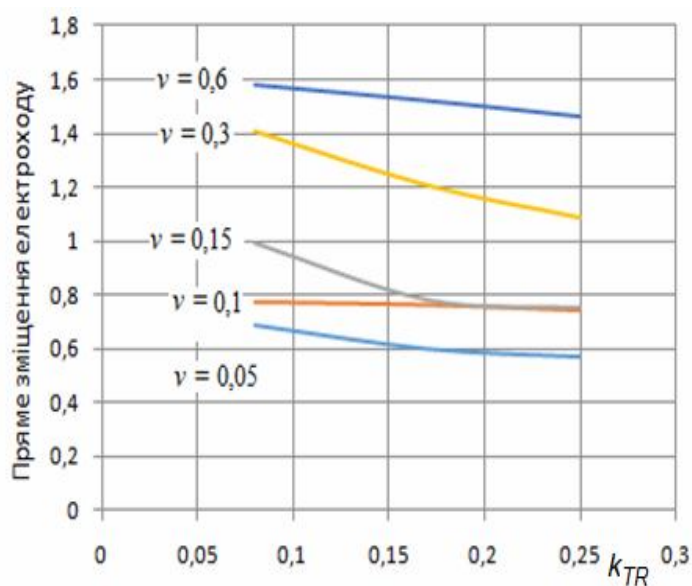


Рис. 3. Вплив k_{TR} на пряме зміщення електроходу при різних швидкості руху v

Вплив частки потужності k_{TR} на тактичний D_{CT} та усталений D_C діаметр циркуляції, показано на рис. 4 та рис. 5.

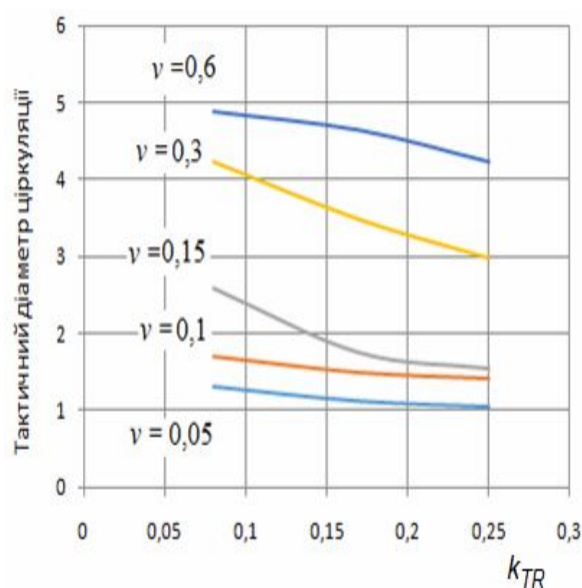


Рис. 4. Вплив k_{TR} на тактичний діаметр циркуляції при різній швидкості руху v

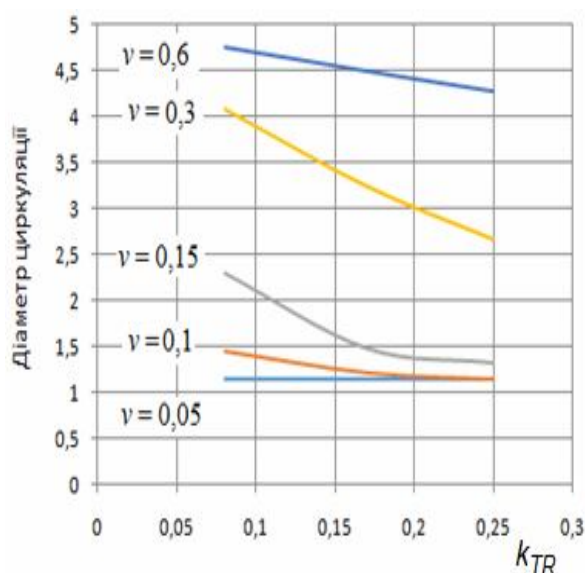


Рис. 5. Вплив k_{TR} на ustalений діаметр циркуляції при різній швидкості руху v

Залежності $X_1(k_{TR})$, $Y_1(k_{TR})$, $D_{CT}(k_{TR})$ та $D_C(k_{TR})$ характеризують вплив потужності підрулюючих пристроїв на параметри траєкторії руху судна. Не менш важливими показниками циркуляційного руху є кутова швидкість обертання Ω_Z , та тривалість циркуляції T_C . Вплив частки потужності на ці показники відображено на рис. 6 та на рис. 7.

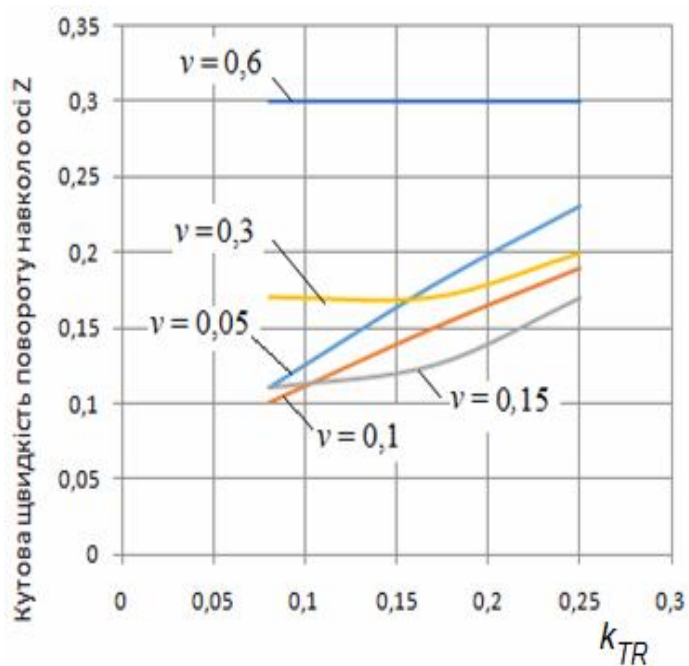


Рис. 6. Вплив k_{TR} на кутову швидкість повороту при різних швидкості v

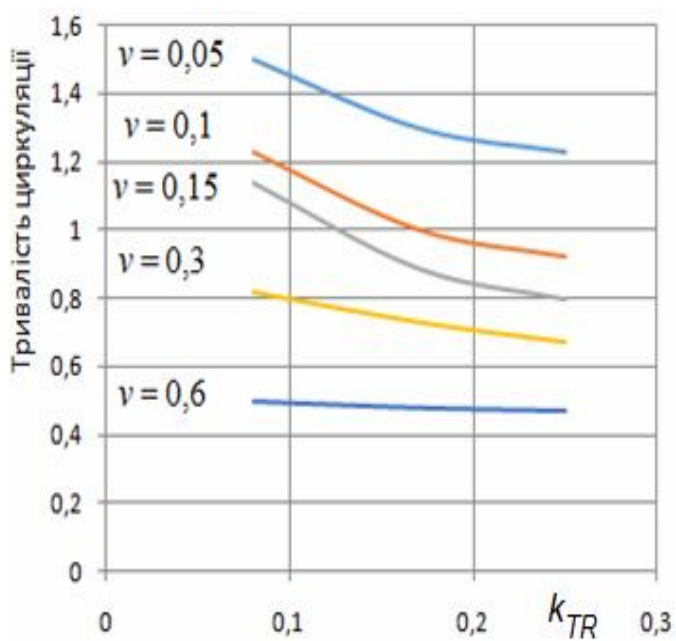


Рис. 7. Вплив k_{TR} на тривалість циркуляції електроходу при різних швидкості v

Результати аналізу впливу частки потужності k_{TR} на показники циркуляційного руху показують, що при зростанні потужності ПП, всі показники траєкторії руху судна й тривалість маневру плавно знижуються, що свідчить про покращення маневрених характеристик судна. У той же час, кутова швидкість обертання Ω_Z навпаки збільшується, що є цілком очікувано.

Ступінь впливу k_{TR} насамперед залежить від швидкості руху v судна, з якою воно виходить на криволінійну траєкторію. При швидкостях більше $v = 0,5$ вплив потужності підрулюючих пристроїв на маневрені характеристики падає. Це цілком вкладається в основні підходи до використання систем активного управління рухом судна – при таких швидкостях руху вони вважаються неефективними.

Зі зниженням швидкості руху судна величина потужності електродвигунів приводів підрулюючих пристроїв починає вже суттєво впливати на маневрені характеристики. Однак цей вплив не такий великий, як очікувався. Причина в тому, що при поступовому зменшенні швидкості до $v = 0,15$ починає позначатися ефект засмоктування, який знижує тягу гвинтів підрулюючих пристроїв та їх момент відносно осі Z . Цей ефект залежить від співвідношення $m = v / v_s$ між швидкістю руху судна v та швидкістю руху струменю води v_s з каналу ПП, й може знижувати тягу та момент до 30 % -50 %.

У проведених дослідженнях розраховувались поточні значення та показники якості роботи основних складових частин суднової електроенергетичної установки. Результати аналізу показують, що на протязі маневрів вони не виходять за допустимі межі. Причина у тому, що при дослідженнях було розглянуто декілька варіантів розподілу навантаження між електродвигунами підрулюючих пристроїв, пропульсивними гребними електродвигунами та загально судновими споживачами електроенергії в єдиної електроенергетичної системі судна. Наприклад при $k_{TR} = 0,17$, це відповідно 0,10; 0,5 та 0,40 відносно сумарної потужності джерел електроенергії. Тому, на відносних швидкостях руху $v = 0-0,6$ (при яких проводились розрахунки) пропульсивні гребні електродвигуни (найбільш потужні споживачі електроенергії) працювали з невеликою потужністю. Зміни у сумарному навантаженні на суднову електростанцію були невеликими, і відповідно до цього, показники електроенергетичної установки залишалися у допустимих межах. Все це свідчить про те, що підрулюючі пристрої забезпечують підвищені маневрені властивості електроходам, не перевантажуючи при цьому його електроенергетичну систему.

Висновки

1. Розроблено метод дослідження перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів з підрулюючими пристроями на маневрах. Метод дозволяє розраховувати поточні значення режимних показників та оцінювати показники якості маневрування всіх основних складових частин пропульсивних комплексів.

2. Проведено аналіз впливу потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневреність електроходів та на експлуатаційні показники їх електроенергетичних установок при виході суден на циркуляцію з різною швидкістю руху.

3. Знайдено закономірності впливу частки потужності електродвигунів ПП на маневрені характеристики. Обґрунтовано необхідність урахування ефекту засмоктування при оцінці маневреності при малих швидкостях руху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zaritskaya O.I. Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development* – Odesa, ONMU, 2022 – № 3(14). P. 110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09>
2. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. 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.
3. Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Wang Ping. 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.
4. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. 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.
5. 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.
6. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. 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..
7. Kupraty O. 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.
8. Ruth E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
9. 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>

10. Yarovenko V.A., Chernikov P.S., Zaritskaya O.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>.
11. Yarovenko V.A. Dynamics of propelling teleelectric 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., Zaritskaya O.I. Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 4(15). P. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05>
13. Oleksandr Shumylo, Volodymyr Yarovenko, Mykola Malaksianj, Oleksiy Melnyk (2003). 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) 314-325. https://www.pfri.uniri.hr/web/en/dokumenti/pomorstvo/2023/12/13_768-Shumylo.et.al.pdf.
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

REFERENCES

1. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zaritskaya O.I. (2022). Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 3(14). P. 110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09> [in Ukrainian].
2. Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Cui Lianzheng, Zhang Zheng, Wang Ping. (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.
3. Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Wang Ping. (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.

4. Abramowicz-Gerigk Teresa, Gerigk Mirosław K. (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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Ruth E. (2008). Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
9. 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> [in Ukrainian].
10. Yarovenko V.A., Chernikov P.S., Zaritskaya O.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].
11. Yarovenko V.A. (2020). Dynamics of propelling teleetric 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., Zaritskaya O.I. (2022). Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 4(15). P. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05> [in Ukrainian].
13. Shumylo Oleksandr, Yarovenko Volodymyr, Malaksianj Mykola, Melnyk Oleksiy (2003). 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.

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 30.02.2025

Посилання на статтю: Шумило О.М., Яровенко В.О., Малаксіано М.О., Іовчев С.І. Вплив потужності електродвигунів підрулюючих пристроїв на маневрені властивості електроходів // *Вісник Одеського національного морського університету*: 36. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 81-99. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-81-99.

Article received 30.02.2025

Reference a journal artic: Schumylo O., Yarovenko V., Malaksiano M., Iovchev S. Influence of thrusters' electric motors power on the maneuvering properties of electric ships // *Herald of the Odessa national maritime university*: Coll. scient. works, 2023. № 3 (77). P. 81-99. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-81-99.