

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-36-52

МЕТОД РОЗРАХУНКУ МАНЕВРЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ

В.О. Яровенко

д.т.н., завідувач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

А.В. Єрпельова

к.ф.-м.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

С.І. Іовчев

к.ф.-м.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

О.В. Кочетков

к.т.н., доцент кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Метою дослідження є розробка аналітичного методу розрахунку показників якості маневрування пропульсивних комплексів електроходів. В основу метода покладено концепцію представлення показників якості їх аналітичними моделями. Побудову аналітичних моделей здійснено за методом активного планування, по спеціально побудованим матрицям планування експериментів. Сформовано алгоритм побудови аналітичних моделей. За результатами відслідювачих експериментів, проведених по спеціально побудованим планам, визначено параметри комплексів, які суттєво впливають на показники якості маневрування. Обґрунтовано форму представлення показників якості. Методом повного факторного експерименту проведено серії чисельних розрахунків та отримано аналітичні моделі показників якості виконання основних маневрів – розгону, гальмування, реверсу, виходу на циркуляцію. Працездатність моделей продемонстровано на прикладі конкретного судна. Проілюстровано можливості моделей щодо прогнозування маневрених властивостей судна. Метод доцільно використовувати на початкових етапах проєктування при обмеженому об'ємі технічної інформації. Аналітичні моделі охоплюють електроходи по класичному варіанту компоновки електроенергетичної установки з будь-якими гребними електродвигунами. Вони дозволяють швидко та з достатньою точністю оцінювати маневрені властивості суден.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електроходу, маневрені режими, активне планування експериментів, аналітичні моделі показників якості маневрування, прогнозування маневрених властивостей суден.

UDC 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-36-52

METHOD FOR CALCULATING MANEUVERING CHARACTERISTICS OF ELECTRIC SHIPS' PROPULSION COMPLEXES

V. Yarovenko

D.Sc. (Eng.), Head of the Department of «Marine Electric Power Engineering, Physics,
Operation of Electrical Equipment»

A. Yerpelova

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department
of «Marine Electric Power Engineering, Physics, Operation of Electrical Equipment»

S. Iovchev

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department
of «Marine Electric Power Engineering, Physics, Operation of Electrical Equipment»

O. Kochetkov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of «Marine Electric Power
Engineering, Physics, Operation of Electrical Equipment»

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The aim of the study is to develop an analytical method for calculating the maneuvering quality indicators of electric ships' propulsion systems. The method is based on the concept of representing quality indicators by their analytical models. The analytical models were constructed using the active planning method, according to specially constructed experiment planning matrices. An algorithm for constructing analytical models was developed. Based on the results of screening experiments conducted according to specially constructed plans, the parameters of the systems that significantly affect the maneuvering quality indicators were identified. The form of representing the quality indicators was substantiated. A series of calculations were performed using the full factorial experiment method, and analytical models of the performance quality indicators for the main maneuvers – acceleration, braking, reversal, and entering circulation – were obtained. The efficiency of the models was demonstrated using a specific vessel as an example. The capabilities of the models for predicting the maneuvering properties of a vessel are illustrated. It is advisable to use this method at the initial stages of design with a limited amount of technical information. The analytical models cover electric ships with a classic version of the electric power plant layout with any propulsion electric motors. They allow to quickly and accurately evaluate vessels' maneuverability.*

Keywords: *electric ship's propulsion system, maneuvering modes, active planning of experiments, analytical models of maneuvering quality indicators, forecasting of maneuvering properties.*

Актуальність та постановка задачі. В останні десятиліття суттєво зріс інтерес щодо використання електроруху у суднобудуванні. Такий перехід – це принципова зміна архітектури побудови енергетичної (а для електроходів – електроенергетичної) системи судна, яка відкриває можливості більш ефективного, економічного та екологічного забезпечення морських перевезень. У порівнянні з системою безпосередньої передачі енергії первинних двигунів на гребні гвинти електрорух дає можливості: зниження експлуатаційних витрат; зменшення витрати палива при роботі на «проміжних ходах» (що все частіше використовується в даний час); вільного компоновання обладнання на судні та вивільнення додаткових площ; підвищення надійності, живучості та гнучкості електроенергетичної установки; зменшення викидів шкідливих речовин у довкілля, поліпшення маневреності та керованості суден. Саме підвищені маневрені якості, простота дистанційного управління електроенергетичною установкою, обумовлюють той факт, що електрорух став основним типом приводу гребних гвинтів на більшості круїзних лайнерів, поромів, криголамах та, все частіше, на суднах іншого типу.

Однією з зазначених переваг електроходів є їхня висока маневреність. Маневреність – це комплекс характеристик судна, які визначають його здатність цілеспрямовано змінювати свій курс і положення в просторі з використанням систем пасивного (стерно) та активного (підрюлюючи пристрої, рушійно-кормові комплекси Azipod) управління рухом судна. Можливість оцінки маневрених властивостей суден на ранніх стадіях їх проєктування є найважливішим інструментом в руках проєктувальника.

Відмінною особливістю роботи електроходів на маневрах є те, що тривалість перехідних процесів в судновій енергетичній установці виявляється порівнянною з тривалістю перехідних режимів роботи самого судна. Тому, традиційні припущення [1; 2] про сталість частоти обертання гребних гвинтів при аналізі руху судна при маневруванні неприйнятні. Так саме неприйнятими є припущення щодо сталості руху судна при розрахунках перехідних режимів роботи його гребної електроенергетичної установки. Ґрунтовний аналіз маневрених режимів роботи електроходів може бути побудований лише при спільному розгляді перехідних процесів, що протікають у всіх складових частинах єдиного суднового пропульсивного комплексу, який включає в себе: теплові двигуни, генератори електричного струму, перетворювачі електроенергії, гребні електродвигуни, рушії, систему автоматичного управління, корпус судна. Тільки так – розглядаючи весь пропульсивний комплекс в цілому – можна оцінити маневрені властивості і судна, і всіх складових частин його силової установки. Розробці одного з таких методів розрахунку, стосовно суден з перспективними електроенергетичними установками, присвячена ця робота.

Метод вирішення задачі. Для аналізу маневрених режимів роботи електроходів у роботі [3] побудовано структурну схему та розроблено математичну модель перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів при маневруванні. Вона визначає перехідні режими роботи всіх складових частин комплексу, якій включає і корпус судна, і гребні гвинти, і судову електроенергетичну установку. Модель універсальна та охоплює переважну більшість сучасних та перспективних суден із електрорухом. Для надання спільності результатам

досліджень математична модель приведена до відносних одиниць. У процесі переходу до системи безрозмірних одиниць було автоматично сформовано критерії динамічної подоби та узагальнені безрозмірні параметри пропульсивного комплексу. Саме ці параметри та критерії подібності визначають (відповідно до рівнянь перехідних процесів розробленої математичної моделі) поточні (у відносному часі) значення (у відносних величинах) режимних показників всіх складових частин комплексу. Відповідно до теорії динамічної подібності [3; 4], комплекси з рівними значеннями безрозмірних параметрів матимуть однакові закони зміни у часі режимних показників, і відповідно однакові значення (у відносних одиницях) показників якості маневрування.

На основі математичної моделі розроблено та представлено в роботах [3; 5] метод розрахунку на ЕОМ перехідних режимів роботи пропульсивного комплексу. В основу методу покладено чисельне рішення системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти 4-го порядку. Як приклад, на рис. 1 наведено поточні (в безрозмірному часі T) залежності режимних показників пропульсивного комплексу електроходу з асинхронними частотно-керованими гребними електродвигунами при виконанні судном комбінованого маневру – розгін та вихід на циркуляцію.

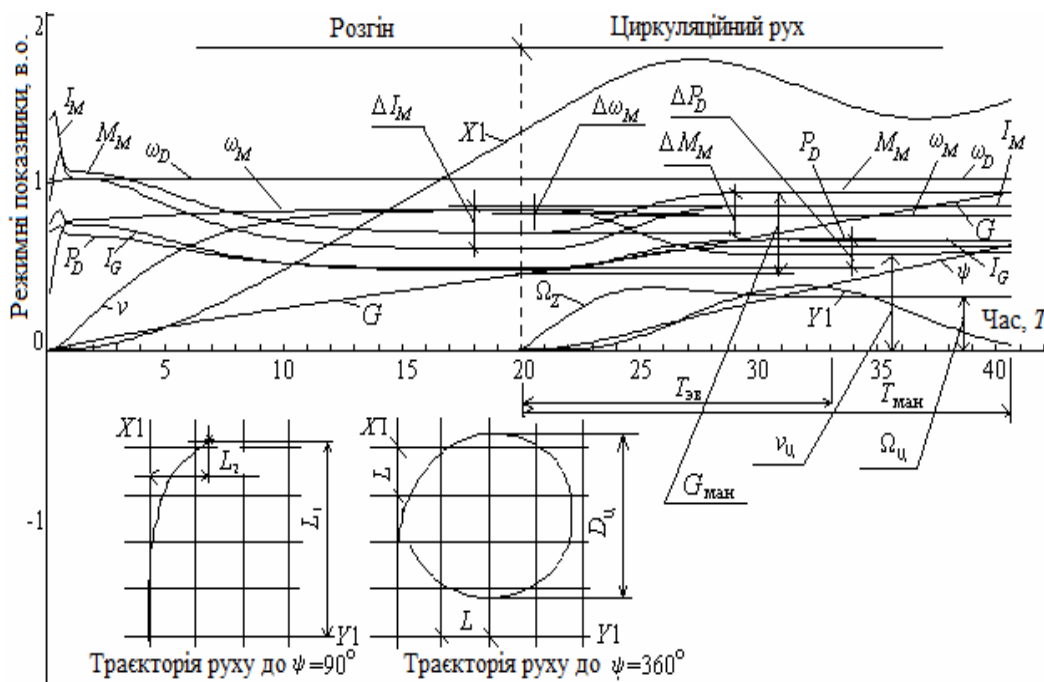


Рис. 1. Режимні показники пропульсивного комплексу при розгоні судна та виході на циркуляцію

Криві, які наведені на рисунку, відповідають: кутовій швидкості обертання ω_D , моменту обертання M_D і потужності P_D первинних двигунів генераторних агрегатів суднової електростанції; відносним витратам палива на виконання

маневру G ; напрузі U_G та струму I_G синхронних генераторів; напрузі U_M та струму I_M гребних електродвигунів (ГЕД); обертовому моменту M_M і кутової швидкості обертання ω_M ГЕД; моменту опору M_P та упору P_P гребних гвинтів; швидкості руху судна v та кутової швидкості його обертання Ω_Z навколо вертикальної осі Z ; пройденому судном (по ходу виконання маневру) шляху $X1$ та $Y1$ у незв'язаній з судном системі координат $OX1Y1Z1$; куту курсу ψ , висуви $L1$ та прямому зміщенню $L2$ судна.

Метод розрахунку режимних показників, якій надано у роботах [5; 6], дозволяє здійснювати кількісну оцінку поведінки кожного елемента комплексу на маневрах. Принципи, які закладені в основу побудови моделі, забезпечують можливість порівняльного аналізу динаміки електроходів з різним типом енергетичної установки за різними критеріями якості.

Розроблений метод, безперечно, є цінним результатом. Він дає можливість проведення детального аналізу зміни всіх режимних показників комплексу під час виконання маневру. Однак, використання розробленого математичного апарату вимагає наявності відповідної математичної підготовки проєктанта та досвіду моделювання, досконалого знання самого об'єкта та наявності повної його повної технічної інформації. На початкових етапах проєктування вичерпної інформації про об'єкт проєктування зазвичай немає. Якщо взяти до уваги той факт, що варіантів реалізації гребної електроенергетичної установки – як за системою електроруху, так і за набором її силових елементів – чимало. Практичне моделювання маневрених режимів, з формуванням обґрунтованих висновків щодо переваг та недоліків кожного варіанту компонування, стає неможливим. Ці методи доцільно використовувати на наступних етапах реального проєктування для конкретизації вже прийнятих концептуальних рішень.

Ще одна особливість процедури проєктування, з якими стикається проєктант вже на початкових її етапах, полягає у наступному: при порівняльному аналізі того, чи іншого варіанта конструкторського рішення, більш цінним є не знання поточних значень режимних показників пропульсивного комплексу, а чисельні значення найважливіших показників якості маневрування. Отримати таку інформацію за допомогою розробленого та детально описаного у роботах [3; 5; 6] методу практично неможливо. На етапах попереднього проєктування, при ескізню опрацюванні можливих варіантів компонування електроенергетичної установки, необхідно мати прості методи аналізу, які не потребують громіздких обчислювальних процедур. Вони повинні давати можливість прогнозувати чисельні значення основних показників якості маневрування пропульсивних комплексів й оцінювати вплив на них конструктивних параметрів електроходів та параметрів їх електроенергетичних установок. Ці методи повинні виходити з умови обмеженого обсягу технічної інформації про об'єкт, що проєктується.

У якості таких методів аналізу, на практиці широко використовуються аналітичні методи розрахунку, які засновані на представленні окремих показників якості їх аналітичними моделями. Аналітичні моделі наочні та зручні для оцінки показників якості маневрування суднових пропульсивних комплексів. Розробка такого методу є метою даного дослідження.

В роботі [3] було запропоновано оцінювати показники якості маневрування за допомогою поліноміальних моделей. Такі моделі повинні адекватно становити залежність цих показників від параметрів пропульсивних комплексів – від його узагальнених безрозмірних параметрів. Побудова таких моделей здійснюється за допомогою методів активного планування експериментів. Численні експерименти проводяться за спеціально складеними планами – матрицями планування. Під експериментом при цьому мається на увазі повний розрахунок законів зміни у часі режимних показників при виконанні відповідного маневру. Розрахунки (чисельне моделювання маневрів) здійснюються на ЕОМ за допомогою математичних моделей [3; 7; 8], які описують перехідні режими роботи пропульсивних комплексів. За результатами розрахунків оцінюються основні показники якості. Таким чином, аналітичні моделі – це узагальнення результатів серії чисельних експериментів, яке надано у вигляді аналітичних співвідношень. Ці співвідношення описують закономірності впливу параметрів комплексів на показники якості маневрування.

Реалізація обчислювальних процедур стикається з певними труднощами. Це зумовлено тим, що кількість параметрів, що входять до системи рівнянь, які описують перехідні режими пропульсивних комплексів, обчислюється сотнями. Після переходу до безрозмірних величин кількість параметрів (узагальнених безрозмірних комплексів, до складу яких входять реальні параметри електроходів) суттєво зменшується та виявляється вже у діапазоні 40-50. Однак, і при такій їх кількості розв'язувати поставлене завдання практично неможливо. У той же час відомо, що значний вплив на показники якості роботи подібних складних електрогідродинамічних систем має дуже невелика (до 8-10) кількість параметрів. Їх необхідно виявити, та побудувати аналітичні моделі показників якості від цих параметрів. У такій постановці завдання, побудова аналітичних моделей здійснюється у два етапи.

Перший етап – виявлення за кожним показником якості «значущих» параметрів, зміни значень яких суттєво впливають на обраний показник. Для цього найчастіше використовують експерименти, що відсівають. Вони дозволяють по кожному показнику обґрунтовано виявити значущі параметри та значущі ефекти взаємодій параметрів, відносячи інші до шумового поля. Стосовно об'єкту, що розглядається, для виявлення значущих параметрів доцільно скористатися методом випадкового балансу. Відповідно до цього методу, були побудовані матриці випадкового балансу і виконані серії експериментів, що відсівають, по повної математичної моделі [3; 6] за допомогою комп'ютерного моделювання. Математична обробка цих результатів дозволила обґрунтовано виявити за кожним показником якості значущі параметри – узагальнені безрозмірні параметри (критерії динамічної подоби) пропульсивного комплексу електрохода. Це – параметри, які розраховуються за співвідношенням:

$$C_{G7} = \frac{K_{GE} W_{GV}}{E_{G0}} \omega_{D0} I_{GV0}; \quad C_{G8} = \frac{K_{GE} \omega_{D0}}{E_{G0}} \frac{m_G \sqrt{2}}{\pi} \frac{W_{G1} k_{GB}}{p_G} I_{G0};$$

$$C_{M16} = \frac{\beta_{M0}}{r_M'^2} \left[(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) \frac{r_{2M}'^2}{\beta_{M0}^2} + 2r_{1M} \alpha_0 \frac{r_{2M}'}{\beta_{M0}} \right]; \quad C_{M17} = \frac{b_M^2}{(r_{2M}')^2};$$

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}'^2} \alpha_0^2; \quad C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1MH}}; \quad C_{M21} = d_M^2; \quad C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}'} \alpha_0;$$

$$C_{M24} = \sqrt{C_{M17} + C_{M18} + \frac{C_{M21}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M22}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M23}}{\beta_{M0}}};$$

$$N_X = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; \quad C_{22} = \frac{c_2 \cdot \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}; \quad C_{21} = \frac{0,5 C_Y \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0}; \quad C_{61} = \frac{2 m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0};$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_{II} (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0} \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0},$$

де ω_{D0} – кутова швидкість обертання первинного двигуна;

I_{GV0} – струм збудження синхронного генератора;

U_{G0} та I_{G0} – напруга та струм генератора;

K_{GE} , m_G , W_{G1} , k_{GB} , p_G та W_{GV} – конструктивні параметри генератора;

E_{G0} – поздовжня складова результуючої ЕРС генератора;

ω_{M0} та ω_{1MH} – кутові швидкості обертання двигуна та магнітного поля статора при номінальній частоті;

β_{M0} – абсолютне ковзання ротора ГЕД;

α_0 – відносна частота напруги живлення ГЕД;

r_{1M} та r_{2M}' – активний опір статора та приведений активний опір ротора ГЕД;

b_M , c_M , d_M , e_M – постійні коефіцієнти частотно-керованого асинхронного електродвигуна;

M_{D0} , M_{M0} – обертовий момент первинного двигуна та гребного електродвигуна;

J_D , J_M – приведені до валу первинного двигуна й до валу ГЕД моменти інерції частин, що обертаються;

m і λ_{11} , λ_{22} – маса судна і приєднані маси води вздовж його поздовжньої та поперечної осей;

P_{e0} – корисний сумарний упор гребних гвинтів;

L – довжина судна; v_0 – швидкість руху судна у базовому режимі роботи;

C_Y^β – коефіцієнт позиційної гідродинамічної сили, яка діє на корпус судна;

F_D – приведена площа зануреної частини діаметральної площини судна;

ρ – питома густина води;

S_Π – приведена площа стерна;

m_1 – коефіцієнт позиційного моменту опору;

C_{m0}^ω – коефіцієнт демпфіруючого моменту опору;

$T = \frac{v_0}{L} t$ – безрозмірний час;

t – поточний час;

c_{DP} – статизм регуляторної характеристики первинного двигуна;

k_1 та k_2 – коефіцієнти, що характеризують швидкість зростання напруги живлення гребних електродвигунів при розгоні та гальмуванні.

Індекс «0» у наведених співвідношеннях відноситься до базового режиму роботи, що відповідає руху судна з номінальною потужністю двигунів по тихій вільній глибокій воді.

Другий етап – побудова аналітичних моделей показників якості маневрування – залежностей показників від значимих (виявлених на першому етапі) параметрів пропульсивного комплексу та значних ефектів взаємодії параметрів.

У роботі [3] запропоновано розраховувати показники якості за допомогою поліноміальних моделей. Ці моделі є наближені аналітичні залежності показників якості маневрування від параметрів пропульсивного комплексу електрохода. При встановленні зав'язків показників якості J з параметрами комплексного пропульсивного q_i використовується прийом адекватного представлення показника $J = J(q_1, q_2 \dots q_n)$ деякою наближеною аналітичною моделлю $J^* = J^*(q_1, q_2 \dots q_n)$. При побудові таких аналітичних моделей найбільше застосування набуло багаточленне наближення $J^*(\mathbf{B}, \mathbf{q})$, де $\mathbf{B}$ – вектор коефіцієнтів наближеного полінома.

Найчастіше, для аналізу суднових електромеханічних систем достатньо обмежитися представленням показників J^* поліномами першого (1), або другого (2) порядків

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j, \quad i \neq j; \quad (1)$$

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} q_i^2 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j, \quad (2)$$

де q_i, q_j – значущі (щодо відповідного показника) параметри комплексу;

b_i, b_{ij} – коефіцієнти наближеного поліному.

Побудова моделей виду (1) та (2) здійснюється за методикою активного планування експерименту (після формування відповідних матриць спостережень). Під кожним експериментом розуміється розрахунок законів зміни у часі режимних

показників пропульсивного комплексу при виконанні відповідного маневру. Розрахунки проводяться за допомогою математичної моделі [3; 6; 7], яка описує перехідні режими комплексів при маневруванні. Вектор $\mathbf{B}$ коефіцієнтів наближеного поліному обчислюється після формування відповідних матриць спостережень (чисельних експериментів) і серій розрахунків (за планами цих матриць) маневрених режимів на ЕОМ. Таким чином, наближені аналітичні моделі $\bar{J} = \bar{J}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ є результатом узагальнень досліджень маневрених режимів, проведених по повній математичній моделі.

У першому наближенні, аналітичні моделі показників якості можна представити поліномами першого порядку – виду (1). Для побудови таких моделей використовується метод повного факторного експерименту (ПФЕ). Методика такого аналізу, а також принципи побудови матриць планування експериментів методом по ПФЕ досить докладно викладені в роботі [3].

Перед процедурами активного планування експериментів потрібно провести підготовчу роботу.

Перший підготовчий етап – знайти можливі діапазони змін значень узагальнених безрозмірних параметрів пропульсивних комплексів. Після проведення експериментів, що відсівають, мова вже йде про діапазони зміни значущих параметрів. Узагальнення наявної інформації по широкому класу суден з електрорухом та результати їх статистичної обробки дозволили знайти діапазони зміни значень безрозмірних параметрів. Вони наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Діапазони зміни значень узагальнених безрозмірних параметрів
пропульсивного комплексу

№	Безроз- мірний параметр	Діапазони зміни значень			№	Безроз- мірний параметр	Діапазони зміни значень		
		min	середн.	max			min	середн.	max
1	N_X	0,06	0,13	0,20	11	C_{M16}	4,16	7,15	14,05
2	N_M	5	5,5	6	12	C_{M17}	0,2	0,5	0,8
3	N_D	1	3,5	6	13	C_{M18}	1	5	9
4	c_{DR}	1,035	1,05	1,065	14	C_{M20}	0,6	0,75	0,9
5	C_{G7}	1,503	1,720	1,936	15	C_{M21}	0,005	0,014	0,023
6	C_{G8}	0,86	1,105	1,350	16	C_{M23}	0,8	1,2	1,6
7	C_{G10}	0,503	0,572	0,671	17	C_{M24}	3,22	5,35	11,85
8	kI	2	5	8	18	C_{61}	2,8	3,5	4,2
9	$C_{\lambda 21}$				19	C_{65}	3	4	5
10	$C_{\lambda 22}$	4,16	7,15	14,05	20	C_{RY}	1,1	1,5	1,9

Другий підготовчий етап – визначитись із показниками якості маневрування. Відповідно до поставленого завдання, особливостей та пріоритетних завдань при проєктуванні електроходів, враховуючи вимоги Стандарту манев-

реності суден, за основу приймаємо показники, що характеризують електрохід та його електроенергетичну установку при розгоні, гальмуванні, реверсі.

Аналітичні моделі основних показників якості маневрування, які були отримані методом повного факторного експерименту, наведено нижче:

а) при розгоні електрохода

• тривалість розгону

$$T_{\text{розг}} = 27,2 - 14,68N_X + 1,97C_{M23} + 1,72C_{M23}C_{M24} - 1,69C_{M20} - 1,59C_{M24} - 1,06C_{M24}C_{M20} - 0,94C_{M20}C_{M23} - 0,88N_XC_{M23} + 0,84N_XC_{M20} - 0,69C_{M24}C_{M17}; \quad (3)$$

• відносні витрати палива на розгін

$$G_{\text{розг}} = 55,07 - 29,09N_X - 10,17C_{M20} + 8,56C_{M23} - 4,99C_{M17} - 3,48N_XC_{M23} + 2,87C_{M24}C_{M17} + 2,76N_XC_{M17} + 2,61C_{M20}C_{M23} - 2,31C_{M24}C_{M20}; \quad (4)$$

• вибіг електроходу наприкінці розгону

$$X1_{\text{розг}} = 11,67 - 6,21N_X - 1,39C_{M20} + 0,56N_XC_{M20} + 0,55C_{M17} + 0,54N_XC_{M23} + 0,49C_{M24}C_{M17} + 0,47C_{M23}C_{M17} - 0,43C_{M24}C_{M20} - 0,4C_{M23} + 0,31C_{M24}C_{M23}; \quad (5)$$

• швидкість руху електроходу наприкінці розгону

$$v_{\text{розг}} = 0,652 - 0,053C_{M23} + 0,051C_{M24} - 0,04C_{M24}C_{M23} - 0,039C_{M20} + 0,037C_{M23}C_{M17} + 0,033C_{M17} + 0,033C_{M24}C_{M17} + 0,031C_{M20}C_{M23}; \quad (6)$$

б) при гальмуванні електрохода

• тривалість гальмування гребних електродвигунів

$$(T_{\text{гальм}})_{\text{ГЕД}} = 0,703 + 0,091C_{M16} - 0,104C_{G7} - 0,074C_{M20} + 0,093N_X + 0,066C_{G8} - 0,059C_{M16}C_{G7} - 0,059C_{M16}C_G - 0,058C_{M16}C_{M20} + 0,04C_{M16}C_{G8} + 0,045C_{G7}C_{M20} - 0,054C_{G7}N_X - 0,045C_{G7}C_{G8}; \quad (7)$$

• нерівномірність швидкості обертання теплових двигунів генераторних агрегатів

$$(\Delta\omega_D)_{\text{гальм}} = 0,0144 + 0,0047N_D - 0,0012C_{DR} + 0,0014C_{G7} - 0,0015C_{G8} + 0,0018C_{M16} - 0,0032N_D C_{DR} + 0,0007C_{G7}C_{DR} - 0,0011C_{G7}C_{M16}; \quad (8)$$

• тривалість перехідних процесів у електроенергетичній установці

$$(T_{\text{гальм}})_{\text{СЕУ}} = 2,056 - 0,897k_2 + 0,25C_{M16} + 0,066C_{G8} - 0,263C_{G7} + 0,084k_2C_{G7} - 0,119C_{M16}C_{G7} - 0,091C_{G8}C_{G7}; \quad (9)$$

• тривалість гальмування пропульсивного комплексу

$$T_{\text{гальм}} = 13,039 - 6,6464N_X - 1,148C_{M16} + 1,367C_{M23} - 0,726C_{M17} + 0,523N_XC_{M16} - 0,867C_{M23}N_X + 0,539N_XC_{M17} - 0,742C_{M16}C_{M23} - 0,789C_{M16}C_{M17} - 0,773C_{M23}C_{M17}; \quad (10)$$

- відносні витрати палива на розгін та гальмування

$$G_{\text{гальм}} = 25,545 - 3,64N_X + 1,26C_{M16} - 2,57C_{M20} + 4,04C_{M23} - 2,61C_{M16} - \\ - 0,79N_X C_{M16} + 1,26N_X C_{M20} - 1,99N_X C_{M23} + 1,7N_X C_{M17} - 1,26C_{M16} C_{M23} \\ + 1,47C_{M20} C_{M23} + 1,04C_{M20} C_{M17}; \quad (11)$$

- вибіг електрохода наприкінці гальмування

$$X1_{\text{гальм}} = 4,03 - 1,76N_X - 0,054C_{M16} - 0,21C_{M20} - 0,1C_{M23} - 0,12C_{M16} C_{M23} + \\ + 0,18C_{M20} C_{M23}; \quad (12)$$

в) при реверсі електрохода

- максимальна потужність теплових двигунів при реверсі

$$(P_{D\text{max}})_{\text{рев}} = 0,751 + 0,223C_{M16} - 0,052C_{G7} + 0,131C_{M23} - 0,076C_{M17} - 0,057C_{M20} + \\ + 0,033C_{M16} C_{M23} - 0,042C_{M16} C_{M20} - 0,032C_{M23} C_{M17} - 0,038C_{M17} C_{M20}; \quad (13)$$

- тривалість реверсу

$$T_{\text{рев}} = 27,765 - 14,672N_X + 3,265C_{M20} - 2,891C_{M16} - 2,3N_X C_{M23} + 1,734N_X C_{M16} - \\ - 1,39C_{M23} C_{M17} - 1,33C_{M16} C_{M17} - 1,17C_{M20} C_{M23} + 1,08C_{M20} C_{M17}; \quad (14)$$

- відносні витрати палива при реверсі

$$G_{\text{рев}} = 40,73 - 20,77N_X + 11,94C_{M23} - 8,3C_{M20} - 7N_X C_{M23} - 4,41C_{M17} + 3,91N_X C_{M20} - \\ - 2,27C_{M23} C_{M17} - 4N_X C_{M17} - 1,7C_{M20} C_{M23}; \quad (15)$$

г) при виході електрохода на циркуляцію

- відносні зміни кутової швидкості обертання гребних електродвигунів та гребних гвинтів

$$\Delta\omega_M = 0,076 - 0,051N_X - 0,029C_{M16} - 0,004C_{61} + 0,006C_{\lambda 21} + 0,004C_{RY} + \\ + 0,016N_X C_{M16}; \quad (16)$$

- відносні зміни потужності теплових двигунів

$$\Delta P_D = 0,227 - 0,129N_X + 0,131C_{M16} - 0,026C_{22} - 0,118N_X C_{M16} - \\ - 0,026C_{M16} C_{65} - 0,02C_{M16} C_{61} + 0,014C_{21} C_{65} + 0,015C_{21} C_{61} - 0,015C_{21} C_{\lambda 21} \\ + 0,016C_{65} C_{61} - 0,014C_{65} C_{\lambda 21} - 0,014C_{61} C_{\lambda 21}; \quad (17)$$

- відносні зміни струму гребних електродвигунів

$$\Delta I_M = 0,205 - 0,138N_X + 0,116C_{M16} - 0,012C_{65} - 0,011C_{61} - 0,013C_{\lambda 21} - \\ - 0,09N_X C_{M16} - 0,011C_{22}; \quad (18)$$

- відносні зміни обертового моменту гребних електродвигунів

$$\Delta M_M = 0,147 - 0,097N_X + 0,121C_{M16} - 0,01C_{65} - 0,008C_{61} + 0,009C_{\lambda 21} - \\ - 0,01C_{22} - 0,088N_X C_{M16}; \quad (19)$$

- тривалість маневру $T_{\text{ман.}}$ та його еволюційний період $T_{\text{эв}}$

$$T_{\text{ман.}} = 36,672 + 13,094N_X - 7,375C_{M16} + 3,484C_{65} + 4,563C_{61} - 4,344C_{\lambda 21} - \\ - 1,891N_X C_{M16} + 2,281N_X C_{65} + 3,953N_X C_{61} - 3,234N_X C_{\lambda 21} - 3,265C_{RY} + \\ + 1,867C_{M16}C_{\lambda 21}; \quad (20)$$

$$T_{\text{ев}} = 14,578 - 5,875N_X - 2,469C_{M16} - 0,782C_{61} + 1,141N_X C_{M16} - 1,106C_{22}; \quad (21)$$

- витрати палива на виконання маневру

$$G_{\text{ман}} = 43,141 + 11,019N_X - 6,725C_{M16} + 3,533C_{65} + 4,693C_{61} - 4,636C_{\lambda 21} - \\ - 3,251C_{RY} - 2,848N_X C_{M16} + 2,3N_X C_{65} + 4,038N_X C_{61} - 3,138N_X C_{\lambda 21}; \quad (22)$$

- відносне зниження швидкості руху судна на усталеному етапі циркуляції

$$\Delta v_{\text{ц}} = 0,375 - 0,296N_X - 0,019C_{65} - 0,021C_{61} - 0,03C_{\lambda 21}; \quad (23)$$

- відносний діаметр усталеної циркуляції

$$D_{\text{ц}} = 6,81 + 4,909N_X + 0,885C_{65} + 1,224C_{61} - 1,21C_{\lambda 21} - 0,806C_{RY} + \\ + 0,69N_X C_{65} + 1,045N_X C_{61} - 0,815N_X C_{\lambda 21} - 0,422C_{M16}C_{\lambda 21}. \quad (24)$$

Вплив змін значень інших параметрів пропульсивних комплексів і інших ефектів взаємодій параметрів, як свідчить статистична обробка результатів розрахунків, значно менше й у подальших розрахунках їх чисельні значення можна приймати постійними.

При практичному використанні аналітичних моделей (3)-(24) слід мати на увазі, що узагальнені безрозмірні параметри, що входять до їх складу, повинні бути представлені в нормованому вигляді. Нормування кожного параметра q_i^n проводиться за співвідношенням

$$q_i^n = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i},$$

де q_{i0} – середнє значення i -го параметру; $\Delta q_i = q_{i \text{ max}} - q_{i0} = q_{i0} - q_{i \text{ min}}$ – можливий інтервал його зміни.

Аналітичний метод зручний у використанні дозволяє оперувати обмеженим обсягом інформації, звільняє проектувальника від необхідності зосередження уваги на другорядних параметрах, без яких, на жаль, детальний аналіз режимів роботи на ЕОМ за «повною» математичною моделлю [4] виявляється неможливим. Розроблені моделі дозволяють швидко та досить просто оцінювати основні показники якості виконання маневрів. Основна сфера застосування методу – етапи ескізного опрацювання, порівняльний аналіз різних варіантів конструкторських рішень.

В якості ілюстрації можливостей розробленого методу розрахунку розглянемо використання отриманих аналітичних моделей стосовно конкретного судна. Прототипом обрано багатоцільовий буксир-рятувальник з електроенерге-

тичною гребною установкою на базі частотно-керованих гребних електродвигунів. Основні технічні характеристики судна: довжина 55 м; ширина 15 м; валова місткість 2500 GT; потужність основних двигунів 2200 кВт; швидкість руху 13 вузлів.

- 4 дизель-генераторні агрегати з сумарною потужністю 10000 кВт;
- перетворювачі частоти;
- два асинхронні гребні електродвигуни потужністю 2300 кВт.

Чисельні значення безрозмірних параметрів пропульсивного комплексу цього судна в абсолютному q_i та у нормованому q_i^n видах представлені у табл. 2.

Таблиця 2

*Значення узагальнених безрозмірних параметрів
пропульсивного комплексу електрохода*

Пара- метр	Значення i - го параметру		Пара- метр	Значення i - го параметру		Пара- метр	Значення i - го параметру	
	q_i	q_i^n		q_i	q_i^n		q_i	q_i^n
c_{DR}	1,04	-0,2	C_{M20}	0,90	0,98	C_{61}	3,6	-0,48
N_D	1,95	-0,63	C_{M23}	0,24	-0,98	C_{65}	4,03	-0,81
C_{G7}	1,51	-1,13	C_{M24}	10,0	1,11	$C_{\lambda 21}$	0,77	-0,75
C_{G8}	0,61	-0,99	C_{RY}	1,5	1,13	N_X	0,141	0,023
C_{M16}	14,4	1,1	C_{21}	3,32	-0,81	-	-	-
C_{M17}	0,02	-0,99	C_{22}	20,5	-0,93	-	-	-

Результати розрахунків основних показників якості для маневрів «розгін», «гальмування», «реверс», «вихід на циркуляцію», які були виконані для цього судна за допомогою аналітичних моделей (3)-(24), представлені у табл. 3 в графі «Аналітичний метод».

Для оцінки похибок, одержуваних при користуванні аналітичними моделями, було проведено розрахунки по повної математичної моделі на електронно-обчислювальній машині. Результати розрахунків наведено також у табл. 3 – графа «Розрахунок на ЕОМ».

Порівняння результатів показує, що похибки (див. графу «η») у визначенні основних показників якості за допомогою аналітичного методу перебувають у допустимих для динамічних завдань межах (3-17 %). Це підтверджує прийнятність наближеного розробленого методу для оцінки маневрених властивостей електроходів на ранніх стадіях проектування.

Не менш важливою перевагою аналітичного методу є можливість прогнозування показників якості виконання маневрів. Як приклад, розглянемо декілька показників маневру «розгін»: тривалість – $T_{розг.}$, відносні витрати палива – $G_{розг.}$ і вибіг електроходу – $X1_{розг.}$. Спробуємо оцінити ступінь впливу значимих параметрів на ці показники, та виявити можливості поліпшення маневреності судна.

Таблиця 3

Показники якості виконання маневрів електроходом

Прямолінійний рух				Циркуляційний рух			
Показ- ники якості	Аналітич- ний метод	Розраху- нок на ЕОМ	η, %	Показ- ники якості	Аналітич- ний метод	Розраху- нок на ЕОМ	η, %
$T_{\text{розг.}}$	20,1	18	11,7	$\Delta\omega_{M1}$	0,048	0,050	3,2
$G_{\text{розг.}}$	32,8	30,4	8,1	ΔP_{D1}	0,387	0,345	12,1
$X1_{\text{розг.}}$	10,4	11,4	8,8	ΔI_{M1}	0,349	0,375	6,9
$v_{\text{розг.}}$	0,75	0,824	8,5	ΔM_{M1}	0,278	0,333	16,5
$T_{\text{тор ГЭД}}$	0,65	0,66	1,5	$T_{\text{эв.}}$	13,4	13	3
$\Delta\omega_{D \text{ тор.}}$	0,01	0,014	12	$T_{\text{ман.}}$	22,6	20,5	9,8
$T_{\text{пер. СУ}}$	2,75	3	8,4	$G_{\text{ман.}}$	31	30,5	1,5
$T_{\text{тор.}}$	9,93	8,6	15,5	Ω_Z	0,258	0,313	17,6
$G_{\text{тор.}}$	21,04	19,6	7,3	$v_{\text{Ц}}$	0,455	0,55	17,3
$X1_{\text{тор.}}$	3,77	3,22	3,8	$D_{\text{Ц}}$	4,13	3,75	10
$P_{D \text{ max}}$	0,857	0,90	5,3	L_1	1,1	1,15	4,6
$T_{\text{рев.}}$	21,47	23,5	8,7	L_2	0,315	0,363	13,2
$G_{\text{рев.}}$	25,1	23,5	6,5				

Найбільш впливовим на обрані показники параметром є (як впливає з отриманих аналітичних моделей), так звана, «енергоозброєність» судна –

$$N_X = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \text{ Для електрохода, який обрано у якості прикладу, значення}$$

цього параметра $N_X = 0,141$, а у нормованому виді – $(N_X)^n = 0,023$ (див. табл. 2). Спробуємо з'ясувати наскільки зміняться чисельні значення обраних показників, якщо сумарний упор гребних гвинтів збільшити, наприклад, на 10 %. У цьому випадку, параметр N_X дорівнюватиме значенню $N_X = 0,16$, а у нормованому виді – $(N_X)^n = 0,23$. Підстановка нового значення N_X в аналітичні моделі для $T_{\text{розг.}}$ (2), $G_{\text{розг.}}$ (4) та $X1_{\text{розг.}}$ (5) дає такі величини показників якості

$$T_{\text{розг.}} = 17,8; \quad G_{\text{розг.}} = 27,58; \quad X1_{\text{розг.}} = 9,20.$$

У порівняно з вихідним варіантом ($T_{\text{розг.}} = 20,1$; $G_{\text{розг.}} = 32,8$; $X1_{\text{розг.}} = 10,4$), ці показники скоротилися відповідно на 11,1 %, 15,9 % та на 11,5 %.

Розглянемо вплив на обрані показники параметра C_{M20} , якій характеризує жорсткість механічних характеристик гребних двигунів. Оцінимо ступінь зміни

показників якості при зменшенні C_{M20} , наприклад, на 10 % (з $C_{M20}=0,9$ до $C_{M20}=0,81$). Після зменшення C_{M20} до $C_{M20}=0,81$, його нормоване значення $(C_{M20})^n$ становитиме 0,2. Підстановка $C_{M20}=0,81$ у співвідношення (3), (4) та (5) дає такі показники:

$$T_{\text{розг.}} = 22,5; \quad G_{\text{розг.}} = 41,4; \quad X1_{\text{розг.}} = 12,5.$$

У порівнянні з вихідним варіантом вони зросли, відповідно, на 12 %, 26,5 % та 19,6 %.

Аналогічно можна проаналізувати вплив будь якого параметра пропульсивного комплексу на обрані показники якості маневрування.

Отримані аналітичні моделі показують яким чином, зміною яких параметрів, в яку сторону й наскільки, можна поліпшити показники якості маневрування, відкриваючи тим самим можливі шляхи поліпшення маневрених властивостей електроходів.

Висновки

1. Запропонований метод оцінки маневрених властивостей електроходів зручний у використанні та дозволяє проєктувальникам оперувати обмеженим обсягом інформації, звільняючи їх від необхідності зосереджувати увагу на другорядних параметрах.

2. Основна сфера застосування методу – етапи ескізного опрацювання, порівняльний аналіз різних варіантів конструкторських рішень, ранні стадії проєктування в умовах обмеженого обсягу інформації. Розроблені моделі дозволяють швидко і досить легко розраховувати основні показники якості маневрування. Формується загальна картина, що описує маневрені властивості електроходу.

3. Аналітичні моделі дають можливість вже на початкових стадіях розробок не тільки прогнозувати маневрені якості проєктованих суден, а й шукати шляхи їх поліпшення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ruth E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
2. 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, pp. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
3. Яровенко В.О. Розрахунок та оптимізація перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів. – Одеса: Маяк, 1999. – 188 с.

4. Yarovenko V.A. Dynamics of propelling electric 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>
5. Schumylo O.M., Yarovenko V.O., Zaritska 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>
6. 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>
7. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S., Zaritska, E. I., & Shumylo 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>
8. 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. Ruth, (2008). E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
2. 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.
3. Yarovenko V.O. (1999). Calculation and Optimization of Transient Modes of Propulsion Complexes for Electric Ships, Odesa: Mayak, 188 p. [in Ukrainian].
4. Yarovenko V.A. (2020). Dynamics of propelling teletric 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>
5. Schumylo J.M., Yarovenko V.O., Zaritska 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].

6. 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].
7. 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].
8. 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 03.11.2025

Посилання на статтю: Яровенко В.О., Єрпельова А.В., Іовчев С.І., Кочетков О.В. Метод розрахунку маневрених характеристик пропульсивних комплексів електроходів // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 36-52. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-36-52.

Article received 03.11.2025

Reference a Journal Article: Yarovenko V., Yerpelova A., Iovchev S., Kochetkov O. Method for calculating maneuvering characteristics of electric ships' propulsion complexes // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 36-52. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-36-52.