

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-100-116

**МЕТОДИ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ
ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОХОДІВ**

В.О. Яровенко

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

О.В. Кочетков

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

А.В. Федоренко

к.ф-м.н., доцент кафедри «Математики, фізики та астрономії»

В.М. Машін

ст. викладач кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Метою дослідження є розробка методу параметричної оптимізації гребних електроенергетичних установок суден з електрорухом.

В основу стратегії оптимізації покладено системний підхід. Комплексні порівняльні оцінки якості побудови електроенергетичних установок запропоновано проводити насамперед за критеріями судна, як старшої системи, для функціонування якої гребна електроенергетична установка і призначена.

Сформовані цільові функції. Розроблено метод пошуку оптимального рішення при багатокритеріальній параметричній оптимізації. Проведено оптимізаційні розрахунки. Знайдено оптимальні параметри гребних електроенергетичних установок, які забезпечують найліпші комплексні показники якості маневрування при різних вагових коефіцієнтах між критеріями оптимальності. Проведено кількісну оцінку ефективності оптимізації.

Проілюстровано суттєве поліпшення основних експлуатаційних показників у суден з оптимізованою електроенергетичною установкою у порівнянні з її вихідним варіантом.

Запропоновано новий метод багатокритеріальної параметричної оптимізації, ефективний для оптимального проєктування гребних електроенергетичних установок електроходів. Доведено ефективність розробленого методу оптимального проєктування.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електроходу, гребна електроенергетична установка, метод параметричної оптимізації, оптимальні параметри гребної установки, підвищення ефективності електроходів, контроль показників електроенергетичної установки.

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-100-116

**METHODS FOR SEARCH OF OPTIMAL SOLUTIONS
WHEN DESIGNING ELECTRIC VESSELS'
PROPULSION POWER PLANTS**

V. Yarovenko

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

O. Kochetkov

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

A. Fedorenko

PhD, Associate Professor Department «Mathematics, Physics and Astronomy»

V. Mashin

Senior Lecturer 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 parametric optimization of propulsion power plants of ships with electric propulsion.*

The optimization strategy is based on a systems approach. It is proposed to carry out comprehensive comparative assessments of the quality of the design of electric power plants primarily based on the criteria of the vessel as the senior system, for the operation of which the propulsion plant is intended.

Target functions have been formed. A method for finding the optimal solution for multicriteria parametric optimization has been developed. Optimization calculations have been carried out. Optimal parameters of the propulsion electric power plant have been found that provide the best comprehensive indicators of maneuvering quality with different weighting factors between the optimality criteria. A quantitative assessment of the optimization efficiency has been carried out. A significant improvement in the main performance indicators of ships with an optimized electric power plant is illustrated compared to the original version. Scientific novelty and practical significance. A new method of multicriteria parametric optimization is proposed, which is effective for the optimal design of electric ships' propulsion power plants. The efficiency of the developed optimal design method has been proved.

Keywords: *electric ship propulsion system, propulsion electric power plant, parametric optimization method, optimal parameters of the propulsion plant, increase in the electric ships' efficiency, monitoring of the electric power plant performance.*

Актуальність та постановка задачі. Об'єктивний вибір оптимальних варіантів суднових гребних електроенергетичних установок (ГЕЕУ) вимагає застосування кількісного комплексного критерію, якій враховує сукупність різномірних показників корисного ефекту та відповідних витрат за кожним

варіантом ГЕЕУ. В основу розробки такого комплексного критерію має бути покладено системний принцип, що передбачає таку побудову будь-якої системи, яка задовольнятиме вимогам старшої системи, для якої вона побудована [1]. Відповідно до цього, порівняльні комплексні оцінки гребних електроенергетичних установок повинні передбачатися за критерієм судна як старшої системи. Спроби отримання будь-яких поліпшених властивостей для елементів ГЕЕУ без урахування їх впливу на старшу систему може призвести до невиправданого витрачання коштів і негативного за підсумками результату.

Для суден з електрорухом до основних експлуатаційних режимів роботи належать маневрені режими. Особлива увага приділяється питанням надійності та безпеки виконання маневрених операцій [2; 3]. Водночас актуальними залишаються й показники економічності та надійності роботи самої енергетичної установки. Виходячи з цього, при організації оптимізаційних процедур, цільові функції пропонується будувати на базі наступних показників якості виконання маневрених операцій:

- витрати часу;
- витрати палива;
- показників якості роботи основних силових частин суднової електроенергетичної установки.

Відповідно до системного підходу [4; 5], показники якості поділені на дві групи: старшу та молодшу. До старшої групи (старшої системи) належать показники судна, до молодшої – показники ГЕЕУ. При оптимальному проектуванні (параметричної оптимізації) пошук оптимальних рішень пропонується проводити спочатку за критеріями старшої групи. Ці критерії, по суті, оцінюють роботу всієї суднової енергетичної установки за «кінцевим результатом». Потім, дотримуючись відомого принципу «погіршення» з урахуванням заданого допуску [1] показників старшої групи, слід оптимізувати параметри за критеріями молодшої групи. Цільові функції на кожному етапі майбутніх оптимізаційних процедур у таких випадках слід будувати у вигляді

$$f(\mathbf{x}) = \sum m_j f_j(x),$$

де m_j – ваговий коефіцієнт j -го показника якості.

Як показали попередні розрахунки, такий підхід дозволяє суттєво прискорити процес пошуку оптимального рішення у порівнянні з одночасною оптимізацією і за показниками судна, і за показниками ГЕЕУ.

Метою цієї роботи і є розробка методу двоступінчастої багатокритеріальної параметричної оптимізації гребних енергетичних установок за комплексними показниками якості.

Основний матеріал. Пошук найліпших методів та способів оптимізації є дуже актуальним та затребуваним напрямком як у теоретичних, так і у практичних дослідженнях в будь-якій науково-технічній галузі. Завдань, які потребують оптимізації, стає дедалі більше. Створюються нові методи, які дозволяють знайти найкращі рішення за найкоротший проміжок часу.

При організації та проведенні оптимізаційних досліджень найбільший час займає правильна постановка та формалізація задачі, підготовка її до розв'язування, аналіз цільової функції, вибір або розробка відповідної процедури оптимізації, підготовка алгоритму розрахунків, тестові обчислення та інтерпретація результатів стосовно реальної системи, що оптимізується. Нерідко, для вибору правильного шляху необхідні додаткові дослідження з аналізом їх результатів та наступними висновками про доцільність використання того чи іншого існуючого методу, або необхідність розробки нового, спеціального методу, який дає можливість найкращим способом розв'язувати поставлені завдання.

Як показує практика, будь-яка реальна оптимізаційна задача, як правило, потребує індивідуального підходу та своїх неформальних методів розв'язання. Повною мірою це стосується проектування таких складних електромеханічних систем, до яких належать пропульсивні комплекси суден з електрорухом. Головною причиною цього є складність математичної моделі об'єкта оптимізації [6; 7] – складність побудови цільової функції. Опис і побудова моделі – найважливіший, найбільш відповідальний і трудомісткий процес. Оцінка в процесі оптимізаційних розрахунків показників якості маневрування судових пропульсивних комплексів може бути здійснена лише за результатами повного розрахунку всього маневру, що здійснюється електроходом. Формальні класичні методи розв'язування оптимізаційних завдань тут, як показали проведені дослідження, або «не працюють», або призводять до зтяжних обчислювальних процедур. Потрібні оригінальні методи оптимізації, які призводять до успіху в найкоротший час.

Математична модель перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів на маневрах надана у роботах [7; 8]. Вона побудована на основі структурної схеми пропульсивного комплексу, представленою на рис. 1.

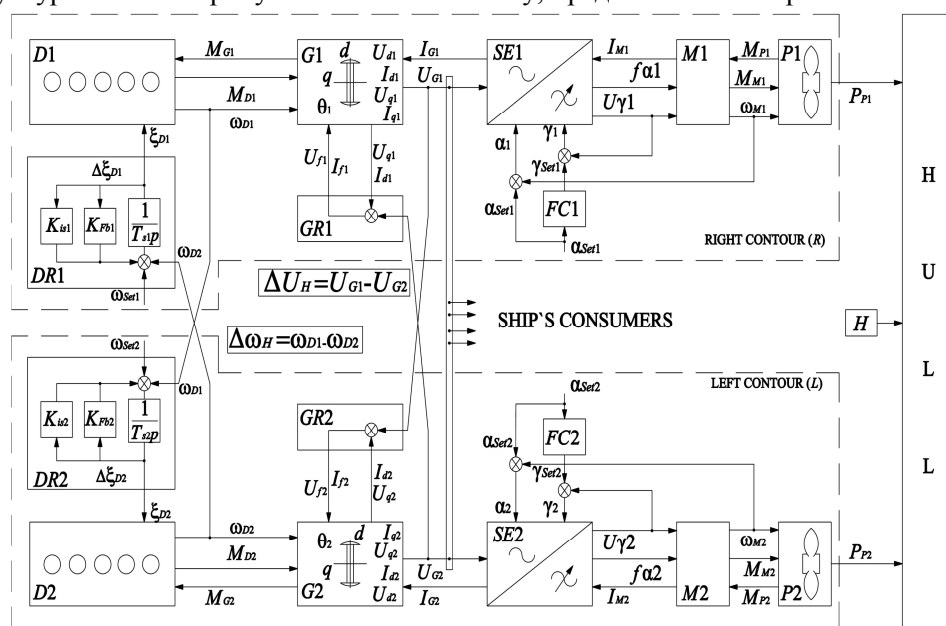


Рис. 1. Структурна схема пропульсивного комплексу електроходу

Гребна електроенергетична установка – її основний компонент. До складу ГЕЕУ входять різні, за природою перебігу в них фізичних процесів, складові частини. Ця система, у свою чергу, входить у єдиний судновий пропульсивний комплекс, який включає, в тому числі, і загальносуднові споживачі електроенергії, і стерна, і корпус судна.

До складу комплексу входять: теплові двигуни – D ; регулятори частоти їхнього обертання – DR ; електромашинні генератори електроенергії – G ; регулятори напруги генераторів – GR ; перетворювачі електроенергії силових контурів електроруху – SE ; гребні електродвигуни – M ; гребні гвинти – P ; кермо – H ; корпус електрохода – $HULL$; система управління – CS . У систему управління входять датчики: потужності – P_D та швидкості обертання – ω_D теплових двигунів; напруги – U_G та струму – I_G генераторів; напруги – U_M , струму – I_M , крутного моменту – M_M та швидкості обертання – ω_M гребних електродвигунів (ГЕД). Кількість ГЕД (і відповідно контурів електроруху) може бути від одного до трьох. Управління кожним з них здійснюється незалежно. У роботах [7; 8; 9] представлено узагальнену математичну модель маневрених режимів роботи гребних електроенергетичних установок у складі пропульсивного комплексу судна, яка побудована на основі наведеної структурної схеми. За допомогою моделі та розробленого на її основі методу розрахунку перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів можна відшукувати [9; 10] поточні значення режимних показників всіх складових частин комплексу по ходу виконання основних маневрів, які входять до «Стандарту маневрених якостей суден» (затвердженого Резолюцією MSC.137(7)). Аналіз та узагальнення результатів розрахунків дозволяє кількісно оцінити основні показники якості маневрування.

Розроблений математичний апарат є основою для розв'язування оптимізаційних завдань.

Цільові функції майбутніх оптимізаційних процедур у таких випадках слід будувати у вигляді

$$f(\mathbf{x}) = \sum m_j f_j(x),$$

де m_j – ваговий коефіцієнт j -го показника якості.

Як показали численні розрахунки, цільові функції, побудовані з вибраних показників якості, є багатоекстремальними, з невідомою кількістю локальних точок мінімумів. Тому, в основу алгоритмів пошуку оптимальних рішень повинні бути покладені методи глобальної оптимізації.

В роботі [1] розроблено спеціальний метод оптимізації стосовно класу задач такого типу. За своєю постановкою ці завдання відносяться до області нелінійного програмування і полягають у пошуку екстремумів мультимодальних цільових функцій $f(\mathbf{x})$ при заданих обмеженнях $g_j(\mathbf{x})$ у вигляді нерівностей

$$\left. \begin{array}{l} f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in E^n; \\ g(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, p, \end{array} \right\},$$

де E^n – допустима область n -мірного простору.

Оптимальним рішенням буде пара $\mathbf{x}^*$ і $f(\mathbf{x}^*)$, до складу якої входять оптимальна точка $\mathbf{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$ і відповідне їй значення цільової функції $f(\mathbf{x}^*)$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}^* &= [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*] \\ f_* &= f(\mathbf{x}^*). \end{aligned} \right\}$$

Визначальний вплив на розробку методу оптимізації і структуру його алгоритму надають властивості цільових функцій $f(\mathbf{x})$. Значення $f(\mathbf{x})$ знаходяться за результатами розрахунків маневрів, які описуються складною системою алгебраїчних і диференціальних рівнянь з численними обмеженнями у вигляді нерівностей. Отримання похідних $f(\mathbf{x})$ неможливо. Крім того, як показали дослідження, цільові функції мають вигляд крутих та витягнутих ярів. Виходячи з цього, в основу розроблених алгоритмів глобальної оптимізації було закладено метод глобального випадкового пошуку – випадковий мултістарт. Для запобігання повторним спускам, до алгоритму оптимізації було включено комбінацію одного з пасивних методів покриття – методу випадкової сітки – з модифікованим методом тунельного алгоритму. Після відшукування точки $f_{\text{орт.лок.}}(\mathbf{x}_{\text{лок.}})$ локального мінімуму область E^n покривається сіткою N незалежних реалізацій, рівномірно розподіленого в E^n випадкового вектора $\mathbf{x}$. Для кожної точки виконується розрахунок цільової функції $f_j(\mathbf{x}_j)$ і порівнюється $f_j(\mathbf{x}_j)$ з $f_{\text{орт.лок.}}(\mathbf{x}_{\text{лок.}})$. Якщо $f_j(\mathbf{x}_j) > f_{\text{орт.лок.}}(\mathbf{x})$, то j -я точка відкидається, як найгірша. При зворотному співвідношенні – $f_j(\mathbf{x}_j) \leq f_{\text{орт.лок.}}(\mathbf{x})$ – здійснюється черговий пошук локального мінімуму. Пошук оптимального рішення закінчується після закінчення вибірки N .

Алгоритми пошуку локальних оптимумів (внутрішніх процедур глобальної оптимізації) створювалися з урахуванням комбінації способів локального спуску і методів яружного пошуку. Яружний пошук локального оптимуму організується наступним чином. Здійснюються два локальних спуску з поблизу лежачих початкових точок $\mathbf{x}_{10} \in E^n$ і $\mathbf{x}_{20} \in E^n$ ($|\mathbf{x}_{20} - \mathbf{x}_{10}| \leq R$, (R – змінний параметр)). З них знаходяться проміжні локальні мінімуми $f_{1*}(\mathbf{x}_{1*})$ і $f_{2*}(\mathbf{x}_{2*})$. Потім визначається новий напрямок $\mathbf{s}^{(*)}$, проведений з $\mathbf{x}_{1*}$ в $\mathbf{x}_{2*}$ (або навпаки), та уздовж його відшукується мінімальне значення функції $f_{\text{орт.лок.}}(\mathbf{x}^*)$, яке є локальним оптимумом.

При локальних спусках найефективнішими виявилися методи Пауелла і Нелдера-Мида, які не вимагають обчислення похідних і добре зарекомендували себе за кількістю обчислень цільової функції і за результатами розв'язування «тестових» задач.

Методи оптимізації, що використовувалися при пошуку оптимумів, поєднувалися з методом штрафних функцій, що дозволило звести задачу нелінійного програмування з обмеженнями до еквівалентної послідовності задач без обмежень. Перетворення здійснюється за допомогою спеціально сконструйованих штрафних функцій

$$\Phi(\mathbf{x}, c_r) = f(\mathbf{x}) + R(\mathbf{x}, c_r) = f(\mathbf{x}) + c_r \Psi(\mathbf{x}),$$

де c_r – параметр штрафу;

$R(\mathbf{x}, c_r) = c_r \Psi(\mathbf{x})$ – штраф;

$\Psi(\mathbf{x})$ – індикаторна функція.

В ході параметричної оптимізації ставилися завдання щодо визначення оптимальних рішень стосовно основних маневрених режимів роботи електроходів. На основі цього визначається стратегія обчислень оптимізації для кожного маневру по кожному критерію оптимальності:

- аналіз цільових функцій;
- аналіз впливу зовнішніх факторів та початкових умов виконання маневру на оптимальне рішення;
- виявлення значущих параметрів та значущих ефектів їх взаємодії.

Нижче наведена процедура використання розробленого методу на прикладі параметричної оптимізації гребних електроенергетичних установок електроходів з частотно-керованими гребними електродвигунами.

У якості критеріїв оптимальності, на яких будуть побудовані цільові функції при параметричній оптимізації обрані

- витрати часу виконання маневру – T ;
- витрати палива на виконання маневру – G ;
- коливання швидкості обертання первинних двигунів – $\Delta\omega_D$;
- максимальна потужність теплових двигунів на маневрах – P_D ;
- тривалість реверсу гребних електродвигунів і гвинтів – $T_{ГЕД}$.

Відповідно до системного підходу показники якості розділені на дві групи: старшу та молодшу. До старшої системи відносяться показники судна (T та G), до молодшої – показники ГЕЕУ ($\Delta\omega_D$, P_D і $T_{ГЕД}$). При параметричній оптимізації пошук оптимальних рішень пропонується проводити спочатку за критеріями старшої групи. Ці критерії, по суті, оцінюють роботу всієї суднової енергетичної установки та всього суднового пропульсивного комплексу «за кінцевим результатом». Потім, дотримуючись відомого принципу «не погіршення» з урахуванням заданого допуску [3] показників старшої групи, слід оптимізувати параметри за критеріями молодшої групи. Цільові функції на кожному етапі майбутніх оптимізаційних процедур у таких випадках слід будувати у вигляді

$$F(\mathbf{x}) = \sum m_j f_j(x) = \min,$$

де m_j – ваговий коефіцієнт j -го показника якості, при обмеженнях у виді нерівностей.

$$g(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, p$$

Узагальнена математична модель маневрених режимів, прийнята за основу побудови процедури параметричної оптимізації, представлена у роботах [1; 6; 7]. Вона була побудована, виходячи з наступних положень.

Найбільш цінними результатами будь-яких наукових досліджень є можливість їх узагальнення, та можливість прогнозування поведінки досліджуваних об'єктів у найбільш характерних ситуаціях, у нашому випадку – прогнозування поведінки електроходів на маневрах. Дослідження повинні охоплювати якомога

ширший клас суден. Вони повинні сприяти як створенню нових електроходів із заздалегідь заданими маневреними властивостями, так і підвищенню ефективності експлуатації вже існуючих. Відповідно до цього, для узагальнення результатів оптимізації, математичні моделі перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів на маневрах слід побудувати на основі теорії динамічної подібності. Для цього необхідно скористатися поняттям наближеного динамічно еквівалентного комплексу та привести модель до системи безрозмірних одиниць. Внаслідок таких перетворень автоматично формуються критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри пропульсивного комплексу. Саме ці критерії та параметри визначають поточні значення режимних показників всіх складових частин комплексу і впливають на чисельні значення основних показників якості маневрування. Комплекси з однаковими значеннями параметрів матимуть однакові закони зміни у часі (відносному) основних режимних показників. Провівши дослідження стосовно цих узагальнених параметрів, можна охопити їх результатами широкий клас електроходів.

У процесі побудови математичної моделі було сформовано [1; 7; 9] критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри комплексу. Додаткові дослідження дозволили із сукупності цих параметрів виявити ті – суттєві параметри – які у найбільшому ступені впливають на обрані показники якості. До них відносяться:

$$C_{G7} = \frac{K_{GE} W_{GV}}{E_{G0}} \omega_{D0} I_{GV0}; \quad C_{G8} = \frac{K_{GE} \omega_{D0}}{E_{G0}} \frac{m_G \sqrt{2}}{\pi} \frac{W_{G1} k_{GB}}{p_G} I_{G0}; \quad C_{G10} = \frac{U_{G0}}{E_{G0}};$$

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

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{(r_{2M}')^2}; \quad C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}'^2} \alpha_0^2; \quad C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1MH}}; \quad C_{M21} = d_M^2; \quad C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}'} \alpha_0;$$

$$N_x = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; \quad N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0},$$

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

I_{GV0} – струм збудження синхронного генератора;

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

K_{GE} , m_G , W_{G1} , k_{GB} , p_G і W_{GV} – конструктивні параметри генератора і його системи збудження;

E_{G0} – поздовжня складова результуючої ЕРС генератора;

ω_{M0} і 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} і r_{2M}' – активний опір статора і приведенний активний опір ротора ГЕД;

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

m і λ_{11} – маса судна і приєднані маси води вздовж його поздовжньої осі;

P_{e0} – корисний сумарний упор гребних гвинтів;

L – довжина судна;

M_{D0} , і M_{M0} – обертовий момент первинного двигуна і обертовий момент ГЕД;

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

(індекс «0» відноситься до базового режиму роботи, що відповідає руху судна з номінальною потужністю двигунів);

c_{DP} – статизм регуляторної характеристики первинних двигунів;

k_2 – коефіцієнт, який характеризує швидкість зростання напруги гребних електродвигунів при гальмуванні.

Ступінь значущості (внесок) цих параметрів в обрані критерії оптимальності наведено (у відсотках) у табл. 1.

Таблиця 1

Внесок суттєвих параметрів на критерії оптимізації

Показ- ник	Суттєво значущі параметри									
	N_X	C_{M23}	C_{M16}	C_{M20}	C_{M18}	C_{M17}	C_{G7}	C_{G8}	N_D	C_D
G	51,7 - 58,4	12,4- 22,7	11,4- 16,7	10,3	4,9	1,12- 13,6	< 3	< 3	< 3	< 3
T	58,5- 64,7	21 - 24,4	4,5- 8	17,4- 23	8,5	14,2- 15,6	< 3	< 3	< 3	< 3
$\Delta\omega_D$	< 3	< 3	16	< 3	< 3	< 3	16	10,6	43,8	13,9
P_D	< 3	21,7	34,6	12,9	< 3	14,7	6,8	< 3	< 3	< 3
$T_{ГЕД}$	16,9	< 3	24,3	17,8	< 3	< 3	29	15,6	< 3	< 3

Отримані результати усереднені за окремими маневрами і враховують, наскільки потрібне, ефекти взаємодій параметрів. З табл. 1 видно, що значний вплив (3 % і більше) на показники G і T надають параметри N_X , C_{M16} , C_{M23} , C_{M20} , C_{M18} , C_{M17} . Тому, саме вони і підлягають оптимізації.

Відповідно до прийнятої стратегії оптимізації, до цієї групи параметрів необхідно додати C_{G7} , як один з найбільш впливових параметрів для критеріїв молодшої групи. Це необхідно зробити для того, щоб у процесі наступної оптимізації – по показникам молодшої групи $\Delta\omega_D$, P_D , $T_{ГЕД}$ – не погіршити суттєво показники старшої групи. Відповідно до системного підходу, пошук оптимальних параметрів пропульсивних комплексів на першому етапі оптимізації слід здійснювати за багатокритеріальним показником

$$F_{GT} = m_G G + m_T T,$$

при змінних вагових коефіцієнтах m_G і m_T .

Спочатку оптимізація була проведена стосовно режиму «розгін» електрохода. Серії розрахунків дозволили визначити оптимальні (за обраною цільовою функцією) поєднання параметрів пропульсивних комплексів, при різних співвідношеннях між ваговими вкладами m_G і m_T . Результати оптимізації наведено у табл. 2.

Таблиця 2

*Оптимальні параметри пропульсивних комплексів
при багатокритеріальній цільовій функції F_{GT} стосовно маневру «розгін»*

		Співвідношення вагових вкладів критеріїв m_G / m_T				
		1 / 0	0,75 / 0,25	0,5 / 0,5	0,25 / 0,75	0 / 1
П а р а м е т р	N_X	0,195	0,195	0,20	0,194	0,195
	C_{M16}	12,775	12,681	11,346	13,187	13,587
	C_{M20}	0,731	0,719	0,681	0,650	0,719
	C_{M18}	8,990	8,990	8,990	7,365	1,00
	C_{M23}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	C_{G7}	1,501	1,501	1,506	1,50	1,50
	C_{M17}	0,503	0,5	0,51	0,507	0,50
F_{GT0}		19,620	14,683	11,277	9,573	7,87
$F_{GT opt}$		6,758	5,590	4,499	3,878	3,13
$\frac{(F_{GT0} - F_{GT opt})}{F_{GT0}}$		0,655	0,619	0,601	0,595	0,602

Аналіз впливу (див. табл. 2) співвідношення вагових вкладів m_G і m_T на значення цільової функції дозволяє зробити такі висновки. Оптимізація параметрів пропульсивних комплексів, відповідно прийнятої стратегії багатокритеріальної оптимізації, дозволяє покращити на 60...65 %, (рядок $\Delta F_{GT} = (F_{GT0} - F_{GT opt}) / F_{GT0}$ у табл. 2)

у порівнянні з «середнім» – F_{GT0} – варіантом) такі найважливіші показники якості виконання маневру, як відносні витрати палива на його виконання – G та тривалість – T . Причому ефективність оптимізації залишається на однаково високому рівні при варіюванні ваговими вкладами m_G і m_T .

Результати, які отримані, відносяться до маневру «розгін». Але, якщо застосувати цю процедуру до іншого маневру, наприклад – реверсу, оптимальні параметри, що наведені в таблиці 2, найімовірніше за все, для цього маневру виявляться неоптимальними. Виходячи з цього, пропонується проводити параметричну оптимізацію стосовно деякого «результуючого» маневру. Таким маневром може бути, наприклад: розгін пропульсивного комплексу до заданого значення швидкості руху судна $v = v_{зад.}$ – реверс до швидкості $v = 0$.

Як приклад, на рис. 2 наведено деякі результати розрахунку такого маневру – відносні поточні значення (у відносному часі) режимних показників пропульсивного комплексу.

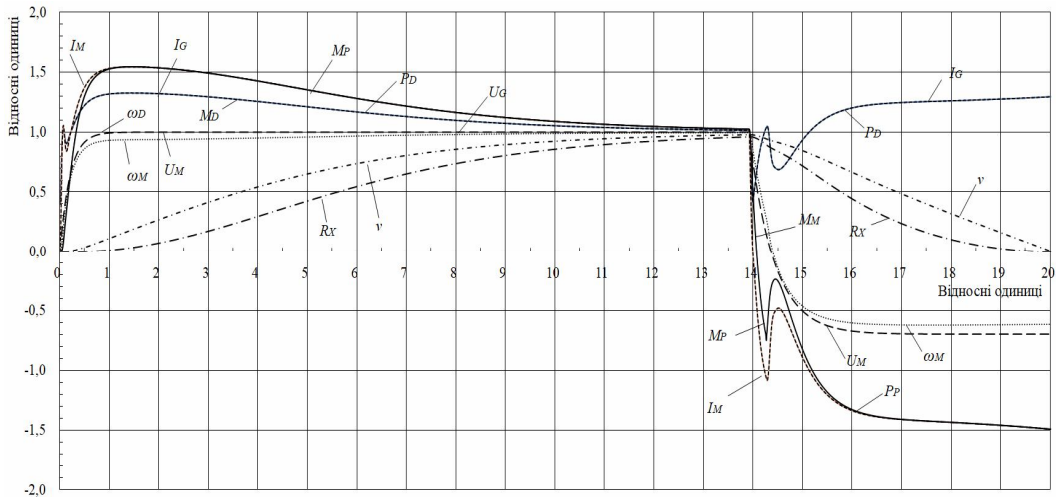


Рис. 2. Поточні значення режимних показників під час виконання маневру «розгін – гальмування»

Криві на рис. 2 відповідають: обертовому моменту M_D , кутовій швидкості обертання ω_D та потужності P_D теплових двигунів генераторних агрегатів; напруги U_G та струму I_M синхронних генераторів; напруги U_M , струму I_M , обертовому моменту M_M та кутовій швидкості обертання ω_M гребних електродвигунів; моменту опору M_P та корисному упору P_P гребних гвинтів; швидкості руху судна – v .

На кожному кроці процедури параметричної оптимізації, за результатами розрахунків такого комбінованого маневру оцінюються ті ж самі показники: витрати часу на виконання маневру – T ; витрати палива на виконання маневру – G ; коливання швидкості обертання теплових двигунів – $\Delta\omega_D$; максимальна потужність теплових двигунів на маневрах – P_D .

У процесі послідовної параметричної оптимізації реальних об'єктів обов'язково присутні етапи прийняття неформальних рішень. А саме – «з'являються» параметри, які апріорно можуть впливати на результати оптимізації, і навпаки, якісь параметри можуть виявитися малозначущими та їх доцільно виключити (обґрунтовано) із процедури. Тому, до групи оптимізованих параметрів допускається обґрунтовано вводити, або виводити додаткові фактори та параметри. Одним з таких факторів, зокрема, є швидкість руху судна $v_{\text{зад}}$. Швидкість $v_{\text{зад}}$ визначає «напруженість» виконання маневрених операцій. Крім того, результати проведених розрахунків за режимами «розгону» і «реверсу» показали, що з оптимізованих параметрів доцільно виключити C_{M17} (він практично залишався постійним – $C_{M17}=0,5$) і додати C_{M22} .

Результати пошуку оптимальних параметрів при різній швидкості судна $v_{\text{зад}}$ (середній – $v_{\text{зад}} \approx 0,5$ і повній – $v_{\text{зад}} \approx 0,9 \div 1$), які були отримані за результатами оптимізаційних розрахунків для різних співвідношень вагових вкладів m_G і m_T , наведені у табл. 3.

Таблиця 3

*Оптимальні параметри пропульсивних комплексів
стосовно «результуючого» маневру*

Параметри	$v_{\text{зад.}} = 0,5$					$v_{\text{зад.}} = 0,9$				
	Вагові вклади критеріїв m_G/m_T					Вагові вклади критеріїв m_G/m_T				
	$\frac{1,0}{0}$	$\frac{0,75}{0,25}$	$\frac{0,50}{0,50}$	$\frac{0,25}{0,75}$	$\frac{0}{1,0}$	$\frac{1,0}{0}$	$\frac{0,75}{0,25}$	$\frac{0,50}{0,50}$	$\frac{0,25}{0,75}$	$\frac{0}{1,0}$
N_X	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
C_{M16}	7,14	7,16	7,16	7,16	10,4	8,49	8,23	8,19	9,19	8,86
C_{M18}	5,11	5,04	5,01	5,01	4,98	4,98	5,02	5,0	4,97	4,88
C_{M20}	0,90	0,88	0,75	0,62	0,61	0,72	0,69	0,68	0,67	0,63
C_{M23}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,81	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
C_{G7}	1,67	1,66	1,64	1,67	1,56	1,59	1,61	1,62	1,63	1,06
C_{M22}	1,06	1,06	1,13	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Значення цільової функції										
F_{GT0}	34,9	30,7	21,1	16,8	14,3	84,9	68,8	52,3	41,9	35,7
$F_{GT \text{ opt}}$	14,9	13,2	11,3	9,31	7,05	28,1	23,7	18,9	15,8	13,4
ΔF_{GT}	0,57	0,57	0,47	0,45	0,51	0,7	0,66	0,64	0,62	0,63

Ефективність оптимізації $\Delta F_{GT} = (F_{GT0} - F_{GT \text{ opt}}) / F_{GT0}$, як видно з табл. 3, досить велика.

Наступний етап оптимізації відбувається за показниками якості функціонування гребної електроенергетичної установки. Це – показники $\Delta \omega_D$, P_D , $T_{\text{ГЕД}}$. Другий етап дозволяє уточнити оптимальні значення C_{M20} , C_{G7} і C_{M16} . Основна вимога – показники старшої групи (показники судна) повинні не погіршитися із заданим ступенем допуску.

На відміну від процесу оптимізації за критеріями старшої групи, оптимізацію параметрів за критеріями $\Delta \omega_D$, P_D , $T_{\text{ГЕД}}$ можна провести послідовно. Це продиктовано такими міркуваннями. При параметричній оптимізації гребних електроенергетичних установок:

- по-перше, серед перерахованих критеріїв можна встановити ієрархічну послідовність їх «вагомостей»;

- по-друге, ряд параметрів, які істотно впливають на $\Delta\omega_D$ (зокрема – N_D і c_D), взагалі не належить до істотно значущих параметрів для інших критеріїв оптимальності.

Таким чином, послідовність параметричної оптимізації за критеріями молодшої групи може бути прийнята наступною: спочатку $\Delta\omega_D$, потім P_D , і нарешті – $T_{ГЕД}$.

Альтернативний варіант оптимізації за показниками молодшої групи – це багатокритеріальна оптимізація (за аналогією з критеріями старшої групи) за критерієм

$$F_{\omega PT} = m_{\omega} \Delta\omega_D + m_P P_D + m_T T_{ГЕД}.$$

Не вдаючись до деталей експертних оцінок вагових вкладів m_{ω} , m_P і m_T , оптимізацію параметрів було проведено для різних поєднань зазначених вагових вкладів m_{ω} , m_P і m_T . Оптимальні рішення для обраних їх сполучень наведено у табл. 4.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4, дозволяє зробити наступні висновки. З трьох критеріїв оптимальності – $\Delta\omega_D$, P_D та $T_{ГЕД}$, що входять з різними ваговими вкладами в цільову функцію $F_{\omega PT}$, перші два вступають у суперечність із третім.

Дійсно, зменшення $\Delta\omega_D$ і P_D досягається за рахунок зниження інтенсивності перебігу перехідних процесів при реверсі гребної установки, але це неминуче веде до зростання тривалості $T_{ГЕД}$ реверсу ГЕД і гребних гвинтів. І навпаки (що виявилось внаслідок проведеної оптимізації – див. табл. 4), зі зростанням $\Delta\omega_D$ та P зменшується тривалість реверсу гребних електродвигунів $T_{ГЕД}$.

Практично у всьому діапазоні зміни значень вагових вкладів m_{ω} и m_P (за умовами, що $m_T \leq 0,3$) оптимальні значення параметрів комплексів залишаються незмінними.

Отримані за результатами оптимізації ефекти поліпшення $\Delta\omega_D$ і P_D також знаходяться на досить близькому рівні: 22,7-24,2 % для $\Delta\omega_D$ і 9,8-21,1 % для P_D .

Разом з тим, слід відмітити, що є програш у тривалості реверсу ГЕД і гребних гвинтів приблизно в 5,6-6,7 %.

Таблиця 4

Оптимальні параметри пропульсивних комплексів
за критеріями $F_{\omega PT} = m_{\omega} \Delta \omega_D + m_P P_D + m_T T_{ГЕД}$
при різних сполученнях вагових вкладів

Пара- метри	Вагові вклади $m_{\omega} / m_P / m_T$									
	1	0,6	0,6	0,6	0,4	0,33	0	0,2	0	0
	0	0,4	0,2	0	0,6	0,33	1	0,2	0,4	0
	0	0	0,2	0,4	0	0,33	0	0,6	0,6	1
C_{M16}	8,1	8,1	8,09	8,1	8,1	8,1	8,1	8,08	8	8,1
C_{M20}	0,89	0,894	0,89	0,89	0,89	0,894	0,89	0,88	0,9	0,85
C_{M18}	5,83	5,850	6,28	5,75	5,85	6,3	5,85	6,95	5,9	5,55
C_{M17}	0,78	0,785	0,78	0,76	0,76	0,785	0,79	0,76	0,75	0,66
C_{G7}	1,81	1,809	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,80
C_{G8}	1,34	1,34	1,33	1,35	1,34	1,33	1,34	1,15	1,05	0,85
N_D	3,95	4	3,98	3,95	4	4	4	4	3	4
c_D	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05
Значення цільової функції $F_{\omega PT}$ та окремих критеріїв, що входять до її складу – $\Delta \omega_D$, P_D , $T_{ГЕД}$										
$F_{\omega PT 0}$	0,909	0,913	0,921	0,928	0,915	0,939	0,939	0,94	0,94	0,94
$F_{\omega PT opt}$	0,689	0,706	0,771	0,828	0,792	0,912	0,918	0,88	0,942	0,903
$F_{\omega PT, \%}$	24,2	22,6	16,3	10,7	22,2	2,8	2,2	5,9	-0,2	3,9
$\Delta \omega_{D0}$	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,03	0,033	0,033
$\Delta \omega_{D opt}$	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,255	0,025	0,03	0,028	0,037
$\Delta \omega_D, \%$	24,2	23,6	22,7	23,3	23,6	22,7	23,6	16,7	13,9	-10,9
$P_{D 0}$	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,81	0,810	0,810
$P_{D opt}$	0,639	0,644	0,650	0,648	0,644	0,650	0,639	0,70	0,707	0,80
$P_D, \%$	21,1	20,5	19,8	20,0	20,5	19,8	21,1	14,1	12,7	1,3
$T_{ГЕД 0}$	0,890	0,890	0,890	0,890	0,890	0,890	0,890	0,89	0,890	0,890
$T_{ГЕД opt}$	0,950	0,950	0,940	0,950	0,950	0,940	0,950	0,89	0,870	0,840
$T_{ГЕД, \%}$	-6,7	-6,7	-5,6	-6,7	-6,7	-5,6	-6,7	0	2,2	5,6

Зі зростанням вагового вкладу m_T ($m_T > 0,5$) поєднання оптимальних значень ряду параметрів – C_{M20} , C_{M18} , C_{M17} , C_{G7} – починають змінюватися. Показники ефективності $\Delta \omega_D$ і P_D падають, а $T_{ГЕД}$ зростає. У граничному випадку (при $m_{\omega} = 0$, $m_P = 0$, $m_T = 1$) вони становлять, відповідно

$$\Delta \omega_D = -10,9 \% ; P_{D \max} = 1,3 \% ; T_{ГЕД \text{ рев.}} = 5,6 \%$$

Таким чином, розроблений спеціальний метод параметричної оптимізації гребних електроенергетичних установок електроходів, побудований за показниками судна і за показниками ГЕЕУ, дозволяє за найменший час відшукувати оптимальні рішення за комплексними критеріям оптимальності. Результати оптимізації підтверджують її ефективність.

Висновки

1. В основу параметричної оптимізації суднових електроенергетичних установок повинен бути покладений системний підхід. Пошуки оптимальних рішень необхідно здійснювати за комплексними критеріями, які передбачають побудову такої системи, яка насамперед задовольнятиме вимогам судна як старшої системи, для якої вона призначена.

2. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації. Правильне встановлення пріоритетів показників якості дає можливість знайти оптимальні параметри електроенергетичних установок, які забезпечують найкращі показники ефективності експлуатації судна, з наданням при цьому задовільної якості перехідних процесів у судовій електроенергетичній установці.

3. Проілюстровано процедуру послідовної параметричної оптимізації гребних електроенергетичних установок, яка направлена на підвищення маневрених характеристик електроходів. Показано суттєве покращення основних експлуатаційних показників оптимізованих пропульсивних комплексів при маневруванні у порівнянні з вихідним варіантом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яровенко В.О. Розрахунок та оптимізація перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів. Одеса: Маяк, 1999. 188 с.
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, P. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
3. Ruth, E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
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 J.M., Yarovenko V.O., Zaritskaya O.I. Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development* – Odessa, ONMU, 2022, № 4 (15). P. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05>.

6. 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>
7. Yarovenko V.A., & Chernikov P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 32-41. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05>
8. 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>
9. 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) P. 314-325. https://www.pfri.uniri.hr/web/en/dokumenti/pomorstvo/2023/12/13_768-Shumylo.et.al.pdf
10. 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.A. (1999). Calculation and Optimization of Transient Modes of Propulsion Complexes for Electric Ships, Odesa: Mayak, 188 p. [in Ukrainian].
2. Kupraty. (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. Ruth, (2008). E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
4. 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>
5. 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].

6. 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].
7. 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].
8. 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].
9. Shumylo Oleksandr, Yarovenko Volodymyr, Malaksianj Mykola, Melnyk Oleksiy (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) 314-325. https://www.pfri.uniri.hr/web/en/dokumenti/pomorstvo/2023/1213_768-Shumylo.et.al.pdf.
10. 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 30.06.2025

Посилання на статтю: Яровенко В.О., Кочетков О.В., Федоренко А.В., Машин В.М. Методи пошуку оптимальних рішень при проектуванні гребних електроенергетичних установок електроходів // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 100-116. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-100-116.

Article received 30.06.2025

Reference a journal artic: Yarovenko V., Kochetkov O., Fedorenko G., Mashin V. Methods for search of optimal solutions when designing electric vessels' propulsion power plants // *Herald of the Odessa national maritime university*: Coll. scient. works, 2023. № 3 (77). P. 100-116. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-100-116.