

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ПОКАЗНИКИ ВИКОНАННЯ МАНЕВРУ «ЗИГЗАГ»

Шумило О. М., к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна, e-mail: shumylo.alexander@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Мета досліджень – розробка методу оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електроходів на маневрені показники. Методика. При маневруванні всі складові пропульсивних комплексів працюють у перехідних режимах, суттєво впливаючи один на одного. Обґрунтовано комплексний підхід до побудови методу оцінки показників маневрування. В основу аналізу закладено математичну модель перехідних режимів суднових пропульсивних комплексів. Використані основні положення теорії динамічної подоби. Результати. Знайдено критерії динамічної подоби, які суттєво впливають на показники маневрування. Розроблено метод оцінки показників якості виконання маневру «зигзаг». Проведено порівняльний аналіз впливу подовження корпусу електрохода на основні показники якості маневрування. Показано, що зі збільшенням довжини судна до 10% основні показники, відповідно зі Стандартами маневреності, не погіршуються. Показники роботи електроенергетичної установки не перевищують допустимі межі. Подовження, з метою економічної доцільності, корпусу судна в зазначених межах допустиме. Наукова новизна. Основні положення, які використані під час побудови методу, забезпечують його універсальність. Перехід до узагальнених безрозмірних параметрів дозволяє охопити дослідженнями великий клас суден. Практична значимість. Розроблений метод розрахунку дає можливість оцінювати ступінь відхилення показників маневреності електроходів при введенні додаткових вставок у корпус судна. З'являється можливість прогнозувати маневрені якості модернізованих суден. Бібл. 15 табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електроходу; моделювання перехідних режимів; маневр «зигзаг»; показники якості маневрування; вплив довжини корпусу.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.056-068

Вступ. За останні 30 років у всьому світі спостерігається позитивна тенденція у розвитку круїзної галузі [1–6]. Відслідковується зростання кількісних показників перевезення – більше ніж 22,2 млн пасажирів на рік. Тенденція щодо збільшення пасажиропотоку, згідно прогнозам експертного середовища, буде залишатися і в найближчому майбутньому.

Зростання пасажиропотоку, у перш за все, може бути задоволено [6] спорудженням нових круїзних суден. Відповідно до цього, останнім часом підвищився попит на будівництво нових великих круїзних лайнерів. Усього за два десятиліття (1988...2009 рр.) довжина найбільших круїзних суден збільшилася на третину (з 268 до 360 м), ширина їх збільшилася майже вдвічі (з 32,2 до 60,5 м), загальна кількість пасажирів також зросла вдвічі (з 2744 до 5400), а тоннаж зріс утричі (з 73 000 GT до 225 000 GT).

Разом з тим слід відмітити, що круїзі лайнери є надзвичайно коштовними спорудами [1–6]. Наприклад, усереднена вартість побудови круїзного лайнера з пасажиромісткістю від 1000 до 2000 пасажирів орієнтовно становить 442 млн дол. США, а вартість судна на 5000 пасажирів і більше – досягає 1,310 млн дол. США. Крім високої вартості спорудження таких суден, швидкому задоволенню попиту ринку перешкоджає значно більша, у порівнянні з транспортними суднами, тривалість їх будівництва – у середньому 1,5 роки.

Альтернативні стратегічні рішення щодо задоволення попиту круїзної галузі, це – модернізація флоту. Модернізація є потужним інструментом збільшення конкурентоспроможності як самих суден, так і галузі взагалі. Модернізація зменшує рівень морального і фізичного старіння суден. Вона має суттєві переваги перед спорудженням нових суден: з одного боку покращує техніко-економічні і техніко-експлуатаційні характеристики судна, з другого – зменшує вартість і тривалість будівництва.

Для морських круїзних суден, життєвий цикл яких складає понад тридцять років, характерною модернізацією є збільшення довжини судна за рахунок виготовлення додаткової вставки корпусу. Вартість такої модернізації може знаходитись в межах від 10% до 30% від початкової вартості виготовлення судна даного проекту [1–8]. При цьому, їх

пасажиромісткість збільшується на 15%...20%. Подібна процедура, незважаючи на збільшення кількості нових суден і термінів їх окупності, мала давню практику застосування в торговому судноплаванні. В останні роки, вона стала актуальною і для круїзного флоту.

Основні питання, які неминуче виникають зі збільшенням довжини корпусу судна, це питання зміни характеристик його міцності, та маневрених характеристик. Зокрема, резолюцією MSC.137(76) "Стандарти маневрених якостей суден", прийнятої на 76 сесії Комітету з безпеки на морі, передбачається, що маневрені характеристики судна, що проєктується, ще на стадії проєктування повинні задовольняти «Стандартам». Якщо ремонт, переробка або модифікація, на думку Адміністрації, може вплинути на маневрені характеристики судна, слід перевірити їхню відповідність «Стандартам».

Постановка проблеми. Питанням розрахунку маневрених якостей суден присвячено фундаментальні роботи [9] відомих вчених, що досліджують питання управління суден. В основі розрахункових методів оцінки покладено результати розв'язання системи диференціальних рівнянь руху судна та роботи двигунів і гребних гвинтів. Практично ж при цьому, традиційно приймається припущення [10, 11], що двигуни гребних гвинтів працюють у сталому режимі і розв'язуються тільки рівняння руху судна [12].

Однак, проведені раніше дослідження [9–11], показали, що крім геометричних параметрів корпусу судна, на його маневрені якості впливають зміна швидкості руху і зміни частоти обертання гребного гвинта. З виходом судна на криволінійну траєкторію його швидкість падає, зростає момент опору гребних гвинтів, збільшуються навантаження на гребні двигуни, частота їх обертання зменшується, що в свою чергу, веде до ще більшого зниження швидкості руху.

Гребні установки сучасних круїзних суден електричні. Вони входять до складу єдиної суднової електроенергетичної установки, тому зі збільшенням навантаження на гребні електродвигуни зростають навантаження на всю електроенергетичну систему. При складних маневрах ці навантаження можуть перевищувати [15] границі, які встановлені для електроенергетичного обладнання, та викликати спрацювання систем захисту. Зважаючи на це, для коректного аналізу показників якості маневрування електрохода, необхідно розглядати весь судновий пропульсивний комплекс, який включає в себе (як нерозривні [9] складові) і корпус судна, і гребні гвинти, і руль (кермо), і гребну електроенергетичну установку.

Стандарти ІМО виділяють найбільш суттєві показники для оцінки маневрених характеристик судна. При оцінці їх керованості, до цих показників якості відноситься контроль «нишпорення», що характеризує реакцію судна на перекладку руля у протилежний бік, як наприклад це має місце, при виконанні маневру «зигзаг». Розробка методу оцінки впливу конструктивних параметрів (довжини) корпусу електрохода на показники якості виконання маневру «зигзаг» є метою цієї роботи.

Мета та задачі дослідження. Мета досліджень полягає в розробці методу оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електроходів на маневрені показники при проведенні розмірної модернізації пасажирських суден. Для поставленої мети необхідно вирішити низку задач:

1) розробити з позицій системного підходу структурну схему, що віддзеркалює взаємодію елементів суднового пропульсивного комплексу, і метод розрахунку ключових показників, які характеризують його роботу;

2) провести порівняльний аналіз впливу збільшення довжини судна на показники якості виконання маневру «зигзаг» і комплексну оцінку цих показників на відповідність стандартам маневреності, які регламентуються Стандартом маневреності згідно Резолюції MSC.137.(76).

3) дослідити вплив подовження судна на якість його керування і на показники роботи суднової електроенергетичної установки, порівняти ці результати з вимогами Регістру судноплавства.

Виклад основного матеріалу. У загальному випадку структурна схема пропульсивного комплексу електроходу має вигляд [13–14], представлений на рис. 1. Вона включає: D – первинні двигуни; G – електричні генератори; SE – перетворювачі електроенергії; M – гребні електродвигуни (ГЕД); P – гребні гвинти; CS – систему управління; DR – регулятори первинних двигунів; GE та ME – пристрої збудження генераторів та гребних електродвигунів; R – кермо; $HULL$ – корпус електроходу. У систему контролю також входять датчики: потужності P_D та швидкості обертання ω_D первинних двигунів; напруги U_G та струму I_G генераторів; напруги U_M , струму I_M , крутного моменту M_M та швидкості обертання ω_M ГЕД.

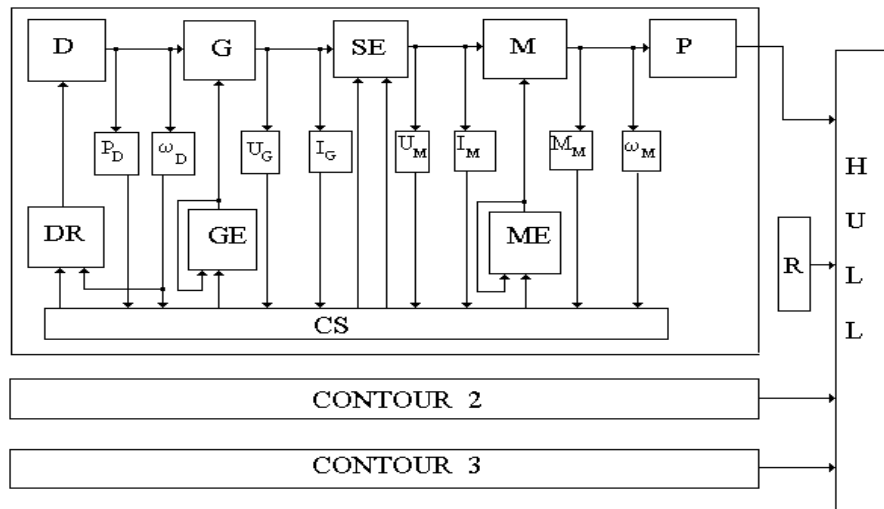


Рисунок 1 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

На основі структурної схеми, для розрахунку поточних (при маневруванні судна) значень режимних показників комплексу розроблено математичну модель перехідних режимів роботи всіх його складових частин [15]. Система рівнянь, яка при цьому була отримана, складна і громіздка. На перехідні режими роботи впливають сотні параметрів. У таких ситуаціях аналізувати вплив конструктивних параметрів на показники якості маневрування майже неможливо. Крім того, результати досліджень, виконаних для будь-якого конкретного судна, відносяться тільки саме для цього судна, що суттєво знижує їхню наукову цінність.

Для скорочення числа параметрів, для надання спільності результатам аналізу, для можливості розповсюдження цих результатів на широкий клас суден доцільно скористатися поняттям динамічно еквівалентного наближеного комплексу [9]. Відповідно до такого підходу, система рівнянь приводиться до безрозмірної форми і в ній виділяються критерії її динамічної подоби – безрозмірні параметри пропульсивного комплексу. За результатами таких перетворень:

- кількість параметрів (тепер вже – критеріїв динамічної подоби системи) скорочується в 5–6 разів;
- з'являються широкі можливості узагальнення результатів досліджень: комплекси з однаковими значеннями параметрів матимуть однаковий характер зміни відповідних режимних показників (у відносних одиницях);
- отримувані результати будуть прийнятні для всіх електроходів класу, що розглядається.

Математична модель та розроблений на її основі метод розрахунку дозволяє відшукувати поточні (у відносному часі) значення (у відносних одиницях) режимних показників на перехідних режимах роботи комплексу. Відносні значення визначаються як відношення поточних значень до базових. Відносний час T визначається як

$$T = \frac{v_0}{L} t, \quad (1)$$

де v_0 – швидкість руху судна в базовому режимі;

L – довжина судна по КВЛ;

t – реальний час.

У процесі моделювання маневрених режимів розраховують значення:

– кутової швидкості обертання ω_D , крутного моменту M_D та потужності P_D первинних двигунів;

– напруги U_G та струму I_G генераторів;

– напруги U_M та I_M струму гребних електродвигунів;

– крутного моменту M_M та кутової швидкості обертання ω_M ГЕД;

– моменту опору M_P та упору P_P гребних гвинтів;

– параметрів руху судна у зв'язаній XYZ (складових швидкості v_X і v_Y вздовж поздовжньої X та поперечної Y осей корпусу судна; кутової швидкості обертання Ω_Z навколо вертикальної осі Z) та у незв'язаній $X_1Y_1Z_1$ (складових швидкості v_{X1} , v_{Y1} , кута швидкості ψ_C курсу та пройденого шляху $X1$, $Y1$) з судном системах координат.

До типових маневрів, що використовуються для оцінки якості управління судном, відноситься так званий зигзаг Кемпфона, якій полягає у періодичній перекладці руля з борту на борт. У стандарти ІМО, у якості стандартних випробування суден, включені два види випробувань на «зигзаг» – $10^\circ/10^\circ$ і $20^\circ/20^\circ$. У першому випадку кермо кладеться на 10° будь-якого борту, а потім, коли напрямку руху зміниться на 10° , перекладається на такий самий кут іншого борту. У другому випадку кут кладки керма та зміна напрямку руху становлять 20° .

Найбільш важливою інформацією, що одержується з випробувань, є:

а) початкова здатність до повороту: із застосуванням кута керма 10° ліворуч/праворуч, судно не повинне пройти більше ніж 2,5 довжини судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу;

б) значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не повинно перевищувати:

– 10 градусів, якщо L/v менше 10 с;

– 20 градусів, якщо L/v становить 30 с, або більше;

– $[5 + 1/2(L/v)]$ градусів, якщо L/v становить 10 с або більше, але менше ніж 30 с, (де L і v виражені в м і м/с відповідно);

в) значення другого кута перевищення в тесті «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не повинно бути більше:

– 25 градусів, якщо L/v менше 10 с;

– 40 градусів, якщо L/v становить 30 с, або більше;

– $[17,5 + 0,75(L/v)]$ градусів, якщо L/v становить 10 с, або більше, але менше ніж 30 с;

г) значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $20^\circ/20^\circ$ не повинно перевищувати 25 градусів.

Імітаційне моделювання процесу виходу електрохода на маневр проводилося мовою JAVA. На рис. 2, який ілюструє схему руху судна при виконанні маневру «розгін – вихід на зигзаг», вказані характерні точки A_i :

A_0 – вихідний стан судна;

A_1 – вихід судна на тестову швидкість $v = 1$; поворот керма у правий борт на тестовий кут β_R ;

A_2 – вихід судна на курс ψ_C (правий борт), що відповідає тестовому куту β_R ; поворот керма на тестовий кут у лівий борт;

A_3 – вихід судна на максимальний кут ψ_C (правий борт) – перший кут перевищення;

A_4 – вихід судна на курс ψ_C (лівий борт), що відповідає тестовому куту β_R ; поворот керма на тестовий кут у правий борт;

A_5 – вихід судна на максимальний кут ψ_C (лівий борт) – другий кут перевищення;

A_6 – вихід судна на курс $\psi_C = 0$; закінчення маневру.

Розгін електроходу здійснювався до значення відносної швидкості руху судна $v = \frac{v_t}{v_0} = 1$, де v_t – поточна швидкість. (Далі, під v розумітиметься саме відносна швидкість).

Після закінчення розгону (точка A_1), починає «зигзаг». Закінчення маневру – у точці A_6 , коли курс судна досягає значення $\psi_C = 0$.

Основними режимними показниками, в процесі розрахунків, обрані перелічені вище:

– параметри руху судна у зв'язаній XYZ та у незв'язаній $X_1Y_1Z_1$ з ним системах координат;

– упор і момент опору гребних гвинтів;

– режимні показники роботи гребних електродвигунів, генераторів та первинних двигунів генераторних агрегатів.

На рис. 3, як приклад, наведено поточні значення режимних показників, які були отримані за результатами моделювання маневру «розгін – вихід на зигзаг» для пасажирського судна – електрохода LIRICA. Розглянуто «зигзаг» $20^\circ/20^\circ$.

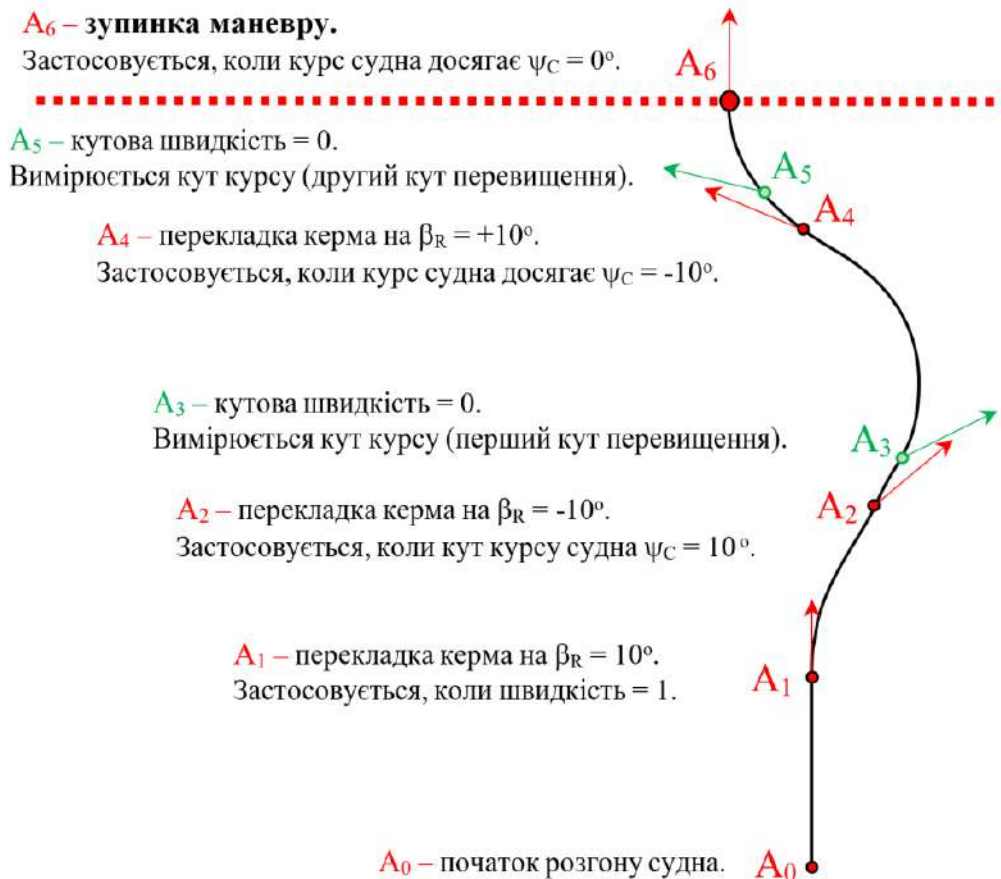


Рисунок 2 – Схема руху судна під час виконання маневру «розгін – вихід на зигзаг»

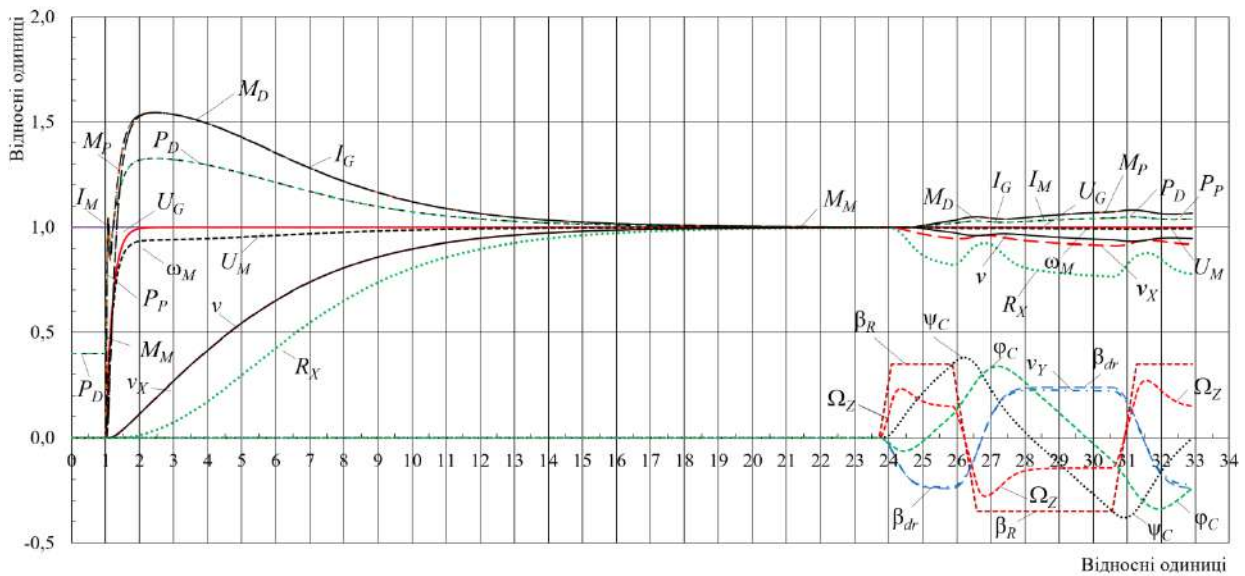


Рисунок 3 – Поточні значення режимних показників при виконанні маневру "розгін – вихід на зигзаг"

Крім перерахованих режимних показників, на рис. 3 показані:

- кут повороту керма β_R ;
- кут дрейфу β_{dr} ;
- складова сили опору води руху судна по поздовжньої осі – R_X .

Аналіз результатів моделювання показує таке. При виході судна на "зигзаг", навантаження на електроенергетичну установку зростають. Причиною цього є коливальні зміни поздовжньої складової R_X сили опору води руху судна і зміни, у зв'язку з цим, швидкості руху v . У результаті – збільшуються навантаження і на гребні електродвигуни, і на генератори, і на теплові двигуни генераторних агрегатів. У той же час, ці додаткові навантаження невеликі і не перевищують допустимих значень.

Траєкторія руху судна на маневрі, що розглядається, показана на рис. 4. Вона відповідає «зигзагу» $10^{\circ}/10^{\circ}$.

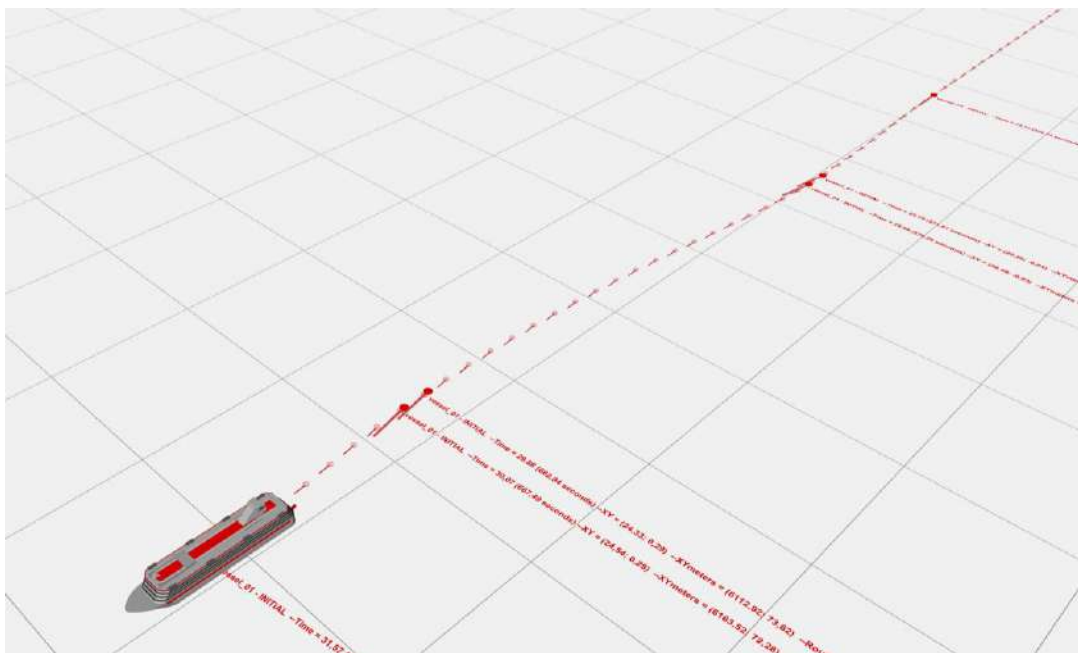


Рисунок 4 – Траєкторія руху судна

Комп'ютерна візуалізація маневру дозволяє проаналізувати траєкторію руху та оцінити всі показники, що характеризують цей маневр. У характерних точках A_i траєкторії, по лівому борту судна (див. рис. 4) проставлені:

- тривалість пройденого етапу у відносному (T) та абсолютному (t) часі;
- пройдений шлях по осях X_1, Y_1 та пройдена судном дистанція S_1 у відносних (в довжинах судна) та абсолютних (у метрах) одиницях;
- швидкість судна v у відносних одиницях;
- кут курсу судна ψ_c .

Розроблений математичний апарат, працездатність якого проілюстрована, дозволяє перейти до вирішення основного завдання – оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу електрохода на показники якості виконання маневру «зигзаг».

Поточні значення режимних показників, і відповідно показники якості маневрування, залежать від узагальнених безрозмірних параметрів пропульсивного комплексу електрохода. У більшість цих параметрів входить довжина судна L . З подовженням корпусу судна значення цих параметрів змінюються, отже змінюються і показники якості виконання маневру. Істотний вплив на показники якості маневрування, при русі судна по криволінійній траєкторії, [13] дають безрозмірні параметри (2) – (17)

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}; \quad (2)$$

$$N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2}; \quad (3)$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{H}{L} \right] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (4)$$

$$C_{M16} = \frac{\beta_{M0}}{r_M'^2} \left[(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) \frac{r_{2M}'^2}{\beta_{M0}^2} + 2r_{1M} \alpha_0 \frac{r_{2M}'}{\beta_{M0}} \right]; \quad (5)$$

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; \quad (6)$$

$$C_{\lambda 2} = \frac{m + \lambda_{22}}{m + \lambda_{11}}; \quad (7)$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}; \quad (8)$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (9)$$

$$C_{12} = \frac{0,07 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (10)$$

$$C_{21} = \frac{0,5C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (11)$$

$$C_{22} = \frac{c_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (12)$$

$$C_{23} = \frac{c_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (13)$$

$$C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (14)$$

$$C_{63} = \frac{2m_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (15)$$

$$C_{64} = \frac{2m_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; \quad (16)$$

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}, \quad (17)$$

де: P_{ej0} і K_{Pj} – корисний упор кожного гребного гвинта та його частка у сумарному потоці відповідно; H і m – осадка судна та його маса; ρ – питома густина води; λ_{11} та λ_{22} – приєднані маси води вздовж осі X та осі Y ; F_D – приведена площа зануреної частини діаметральної площини судна; J_Z та λ_{66} – момент інерції судна та приєднаний момент інерції води при обертанні навколо осі Z ; μ_{rx} – коефіцієнт опору керма; μ_k – коефіцієнт бічної сили керма; ψ_c – кут курсу; S_c – приведена площа керма; C_Y^β , c_2 , c_3 – коефіцієнти сили корпусу; m_1 , m_3 , m_4 – коефіцієнти позиційного моменту опору; C_{m0}^ω – коефіцієнт демпфуючого моменту опору; β_{M0} – абсолютне ковзання ротора ГЕД; α_0 – відносна частота напруги ГЕД; r_{1M} , r_{2M}' і b_M , c_M , d_M , e_M – параметри та постійні коефіцієнти асинхронного частотно-керованого гребного електродвигуна.

Як приклад, розглянуто згадане вище, круїзне пасажирське судно – електрохід LIRICA (далі – базове судно), основні параметри якого наведені у табл. 1. Альтернативне судно – це електрохід з тією ж електроенергетичною установкою, але з подовженим на 25 м корпусом. Його параметри наведені у тій же таблиці.

Таблиця 1 – Основні параметри електроходів

Параметр	Базове судно	Альтернативне судно	Параметр	Базове судно	Альтернативне судно
1	2	3	4	5	6
Маса, т	29 698	32 757	Сумарний упор гребних гвинтів, кН	1602	1602
Довжина по КВЛ, м	251,2	276,2	Ширина по КВЛ, м	32	32

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Момент інерції гребного гвинта, кг·м ²	7132	7132	Обертальний момент ГЕД, кН·м	146,1	146,1
Осадка середня, м	6,6	6,2	Коефіцієнт засмоктування	0,136	0,137
Швидкість руху, м/с	11,3	11,3	Діаметр гвинта, м	4,95	4,95
Момент інерції судна навколо осі Z, кг·м ²	1,56·10 ¹¹	2,08·10 ¹¹	Частота обертання гребного гвинта, об/хв	120	120
Коефіцієнт повноти мідель шпангоуту	0,98	0,98	Пропульсивна потужність одного ГЕД, кВт	9180	9180
Приведена площа зануреної частини ДП, м ²	1615	1668	Приведений до валу ГЕД момент інерції, кг·м ²	7404	7404
Коефіцієнт приєднаних мас води навколо осі X	0,013	0,01	Коефіцієнт приєднаних мас води вздовж осі Y	0,386	0,365
Коефіцієнт приєднаних мас води навколо осі Z	0,332	0,32	Потужність електроенергетичної установки, кВт	30 600	30 600
Площа керма, м ²	28	28			

Чисельні значення узагальнених безрозмірних параметрів для базового та альтернативного електрохода представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Узагальнені безрозмірні параметри комплексу

Параметр	Чисельні значення		Параметр	Чисельні значення	
	базове судно	альтернативне судно		базове судно	альтернативне судно
C_{12}	4,505	4,654	C_{65}	7,454	7,422
C_{21}	0,418	0,366	C_{RY}	8,15	8,15
C_{22}	47,76	44,54	N_X	0,104	0,1047
C_{23}	5,79	5,98	N_Ω	0,631	0,636
C_{61}	3,73	3,324	$C_{\lambda 2}$	1,168	1,351
C_{63}	4,385	4,813	$C_{\lambda 21}$	0,736	0,703
C_{64}	0,644	0,266	N_M	5,1	5,1
			C_{M16}	7,15	7,15

Відповідно до Стандартів маневреності (Резолюція MSC.137(76)), для електроходів, параметри яких приведені у табл. 1, критерії оцінки маневру «зигзаг»:

– із застосуванням кута керма 10° ліворуч/праворуч, судно не повинно пройти більше ніж 2,5 довжини судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу;

– значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» 10°/10° не повинно перевищувати $[5 + 1/2(L/v)]$ градусів; для базового електрохода, при $L = 251,2$ м і $v = 11,3$ м/с, це становить 16,1 градусів; для альтернативного електрохода, при $L = 276,2$ м і $v = 11,3$ м/с, значення першого кута перевищення не повинно перевищувати 17,2 градусів;

– значення другого кута перевищення у тесті «зигзаг» 10°/10° не повинно бути більшим $[17,5 + 0,75(L/v)]$ градусів; для базового електрохода це становить 34,15 градусів; для альтернативного – 35,8 градусів;

– значення другого кута перевищення в випробуванні «зигзагом» 20°/20° не повинно перевищувати 25°.

Вплив довжини корпусу електрохода на маневр «зигзаг» оцінено за результатами моделювання обох маневрів – «зигзаг» 10°/10° та «зигзаг» 20°/20°. Маневри виконані за

схемою, наведеною на рис. 2. На рис. 5 представлені траєкторії руху базового та альтернативного електроходу по варіанту $20^\circ/20^\circ$. У початковий момент часу A_0 судна розташовані в початку системи координат, але зі зміщенням (для зручності подання та аналізу результатів) по поперечній осі Y . У момент часу $T=0$ починається розгін. При досягненні швидкості $v=1$ починається маневр «зигзаг», відповідно до стандартної процедури. Маневр закінчується, коли судна виходять на курс $\psi_C = 0$. У характерних точках траєкторій базового та альтернативного судна, за аналогією з рис. 4, представлена інформація про тривалість етапу, пройденого шляху, швидкості та курсу судна.

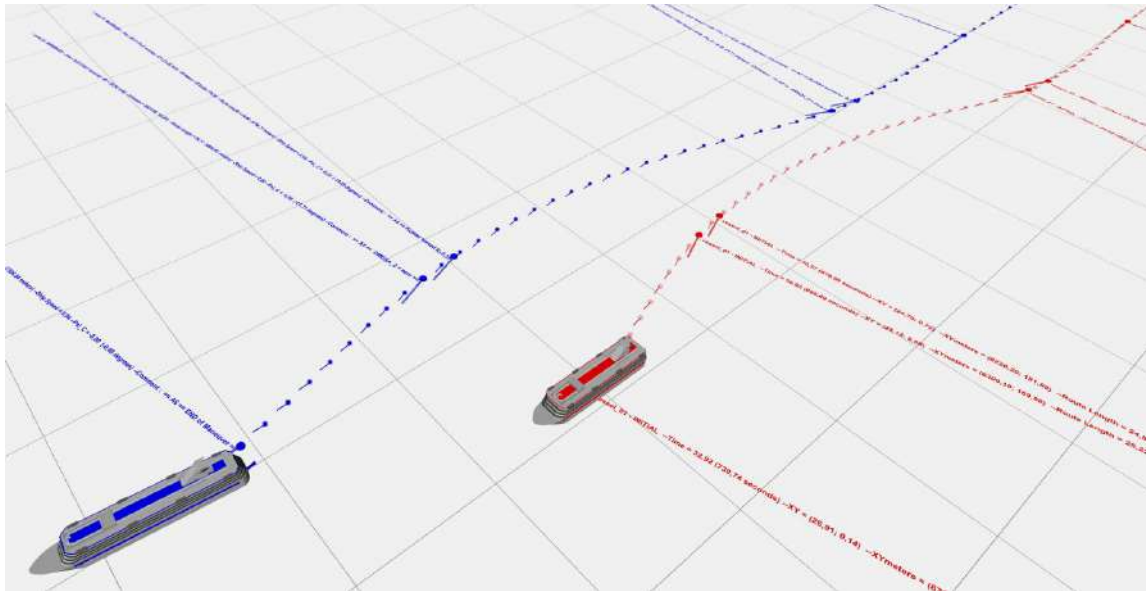


Рисунок 5 – Траєкторії руху базового та альтернативного електроходів

Результати порівняльного аналізу основних показників маневру у базового та альтернативного електроходів наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати порівняльного розрахунку маневру «зигзаг»

Електроход	Показники маневру «зигзаг»			
	Шлях судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу	Перший кут перевищення у випробуванні зигзагом $10^\circ/10^\circ$	Другий кут перевищення у випробуванні зигзагом $10^\circ/10^\circ$	Перший кут перевищення у випробуванні зигзагом $20^\circ/20^\circ$
Стандарт ІМО	$< 2,5 L$	$< 16,1^\circ$	$< 34,15^\circ$	$< 25^\circ$
Базовий	2,01	10,53	10,51	20
Альтернативний	1,84	10,59	10,52	19,99
Відхилення показника, %	- 8,5 %	+ 0,5 %	+ 0,1 %	- 0,05 %

Порівняння результатів розрахунків показує таке. Зі збільшенням довжини судна, більшість показників якості управління, що оцінюються за маневром «зигзаг», практично не змінюються і залишаються у встановлених Стандартом межах. Більше того – шлях, яким проходить судно до моменту зміни курсу на 10° (початкова здатність до повороту), зменшується на 8,5 %, що свідчить про покращення цього критерію.

І у базового, і альтернативного електроходів, із виходом на «зигзаг», у зв'язку зі зміною R_x , змінюється швидкість руху судна. Ці зміни мають нерегулярний характер. У результаті – зростання навантажень на всі складові судової електроенергетичної установки. Але, ці додаткові навантаження невеликі і не перевищують допустимих значень.

Висновки

1. На певному етапі життєвого циклу пасажирських суден встає питання збереження економічної ефективності їх експлуатації. Один із варіантів розв'язування цього питання – модернізація суден зі збільшенням їхньої довжини. Ухвалення рішення про доцільність такої модернізації можливе за умовами непогіршення керованості суден.

2. Запропоновано метод оцінки показників якості маневрування суден з гребними електроенергетичними установками. Оцінку слід проводити з урахуванням перехідних режимів роботи у всіх складових частинах єдиного суднового пропульсивного комплексу. Надано структурну схему комплексу та запропоновано метод розрахунку цих показників.

3. На прикладі конкретного електрохода та його альтернативного (з подовженим корпусом) варіанта проведено порівняльний аналіз впливу довжини корпусу на показники якості виконання електроходами маневру «зигзаг». Оцінку здійснено за показниками, що відповідають Стандартам маневреності Резолюції MSC.137(76).

4. Показано, що при збільшенні довжини судна в межах 10% основні показники виконання маневру практично не змінюються. Якість керування судном не погіршується. На показники якості роботи суднової електроенергетичної установки зміна довжини впливає, проте ці зміни не перевищують меж, регламентованих Регістром. При оцінці доцільність подовження корпусу судна у зазначених межах, слід керуватись саме економічними цілями подібної модернізації.

Перспективою подальших досліджень є розроблення методів оцінки інерційних характеристик та аналізу маневрених режимів суднових пропульсивних комплексів на основі теорії динамічної подібності при проведенні розмірної модернізації суден, як вагомого фактору, що забезпечує їх безаварійну експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cruise Market Watch : веб-сайт. URL: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins> (Last accessed: 15.06.2023).

2. Cruise Lines International Association (CLIA). URL: <https://www.cruising.org.au> (Last accessed: 16.06.2023).

3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). Access mode. Electronic resource : www.dnv.com. Alexandros Chiotopoulos, Gerd-Michael Wuersig, Atle Ellefsen. Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. LNG as ship fuel the future. Today No 01. 2014.

4. Шумило О. М. Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 4 (15), С. 58–77.

5. Saunders, Aaron. *Giants of the Sea : The Ships that Transformed Modern Cruising*. Seaforth Publishing, 2013.

6. Rudenko Sergey, Shakhov Anatoliy, Lapkina Inna, Shumylo Oleksandr, Malaksiano Mykola, Horchynskiy Ihor. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211999743>.

7. Dmytro S Minchev, Oleksiy A Gogorenko, Roman A Varbanets, Yuri L Moshentsev, Vaclav Pi'ste`k, Pavel Kuc`era, Oleksandr M Shumylo and Vladyslav I Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Journal of Automobile Engineering* 1–13 IMechE 2022 Article reuse guidelines : sagepub.com/journals-permissions <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.

8. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. Roman Varbanets, Oleksandr Shumylo, Marchenko Andrey Petrovich, Dmytro Minchev, Vladyslav Kyrnats, Vitalii Zalozh, Nadiia Aleksandrovska, Roman Olehovych Brusnyk, Kateryna Volovyk. *POLISH MARITIME RESEARCH* 4 (116). 2022. Vol. 29, P. 88–96 [10.2478/pomr-2022-0046](https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046). DOI: [10.1177/09544070221075419](https://doi.org/10.1177/09544070221075419) journals.sagepub.com/home/pid <https://sciendo.com/article/10.2478/pomr-2022-0046>.

9. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном : Монография. Ленинград : Судостроение, 1983. 272 с.
10. 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.
11. 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.
12. Golikov V. A., Golikov V. V., Volyanskaya Y., Mazur O., Onishchenko O. A simple technique for identifying vessel model parameters. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 172 (1), DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/172/1/012010>.
13. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов: Монография. Одесса: Маяк, 1999. 188 с.
14. Яровенко В. А., Черников П. С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. Вип. 6, С. 32–41. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
15. Яровенко В. А., Черников П. С., Зарицкая Е. И., Шумило А. Н. Управление гребными электродвигателями электроходов при движении по криволинейной траектории. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. Вип. 5, С. 58–65. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.5.09.

REFERENCES

1. Cruise Market Watch: веб-сайт. URL: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins>.
2. Cruise Lines International Association (CLIA). URL: <https://www.cruising.org.au>.
3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). (2014). Access mode. Electronic resource: www.dnv.com. Alexandros Chiotopoulos, Gerd-Michael Wuersig, Atle Ellefsen. Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. LNG as ship fuel the future. Today No 01.
4. Shumylo, O. (2023). Optymizatsiya rozmirnoyi modernizatsiyi pasazhyrskikh suden z urakhuvanniam enerhoefektyvnosti. *Rozvytok transportu*.
5. Saunders, Aaron. (2013). *Giants of the Sea : The Ships that Transformed Modern Cruising*. Seaforth Publishing.
6. Rudenko Sergey, Shakhov Anatoliy, Lapkina Inna, Shumylo Oleksandr, Malaksiano Mykola, Horchynskiy Ihor. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211999743>.
7. Dmytro S Minchev, Oleksiy A Gogorenko, Roman A Varbanets, Yuriy L Moshentsev, Vaclav Pířteřk, Pavel Kucěra, Oleksandr M Shumylo and Vladyslav I Kyrnats. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Journal of Automobile Engineering* 1–13 IMechE 2022 Article reuse guidelines : sagepub.com/journals-permissions <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
8. Varbanets Roman, Shumylo Oleksandr, Marchenko Andrey Petrovich, Minchev Dmytro, Kyrnats Vladyslav, Zalozh Vitalii, Aleksandrovska Nadiia, Brusnyk Roman Olehovych, Volovyk Kateryna. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *POLISH MARITIME RESEARCH* 4 (116) Vol. 29, P. 88–96 10.2478/pomr-2022-0046. DOI: 10.1177/09544070221075419 journals.sagepub.com/home/pid <https://sciendo.com/article/10.2478/pomr-2022-0046>.
9. Pershyts, R. (1983). *Upravlyaemost' y upravlenye sudom*: Monohrafiya. Lenynhrad: Sudostroenye.
10. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. (2020). Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. *Ocean Engineering*, vol. 209 (92): 107463. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.

11. 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. P. 7–23. DOI: 10.26408/118.01.
12. Golikov, V. A., Golikov, V. V., Volyanskaya, Y., Mazur, O., Onishchenko, O. (2018). A simple technique for identifying vessel model parameters. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 172 (1), DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/172/1/012010>.
13. Yarovenko, V. A. (1999). *Rozrakhunok i optymizatsiya perekhodnykh rezhymiv propul'syvnnykh kompleksiv elektrokhodiv* : Monohrafiya. Odesa.
14. Yarovenko, V. A., Chernykov, P. C. (2017). Metod rozrakhunku perekhodnykh rezhymiv hrebnykh elektroenerhetychnykh ustanovok elektrokhodiv. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 32–41. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
15. Yarovenko, V. A., Chernykov, P. C., Zarytskaya, E. I., Shumylo, A. N. (2020). Upravlinnya hrebnymy elektrodvyhunamy elektrokhodiv pry rusi po kryvolynynoy traektoriyi. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 58–65. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.5.09.

Shumylo O. M. INFLUENCE OF THE ELECTRIC SHIPS' DESIGN PARAMETERS ON THE PERFORMANCE OF THE «ZIGZAG» MANEUVER

The purpose of the research is to develop a method for assessing the influence of the design parameters of electric ships' hull on maneuverability. Methodology. When maneuvering, all components of the propulsion systems operate in transient modes, significantly influencing one another. A comprehensive approach to the construction of a method for estimating maneuvering indices is substantiated. The analysis is based on a mathematical model of transient modes of ship propulsion systems. The main provisions of dynamic similarity theory are used. Results. Criteria of dynamic similarity are found, which significantly affect the maneuver capability indices. A method for assessing the quality indices of the «zigzag» maneuver performance has been developed. A comparative analysis of the effect of the electric ship hull elongation on the main maneuvering quality indices has been carried out. It is shown that with an increase in the length of the vessel up to 10%, the main indices in accordance with the Maneuverability Standards do not deteriorate. The performance of the electric power plant does not exceed the permissible limits. For the purpose of economic feasibility, elongation of the ship's hull within the specified limits is permissible. Scientific novelty. The main provisions used in the construction of the method for assessing the quality indices of the «zigzag» maneuver performance ensure its versatility. The transition to generalized dimensionless parameters makes it possible to cover a large class of vessels by research. Practical significance. The developed method of calculation enables us to evaluate the degree of deviation of electric ships' maneuvering indices when additional inserts are introduced into the ship's hull. It becomes possible to predict the maneuvering properties of modernized ships. Bibl. 15 tab. 3, fig. 5.

Key words: electric ship propulsion system; modeling of transient modes; «zigzag» maneuver; maneuvering quality indices; influence of hull length.

© Шумило О. М.

Статтю прийнято
до редакції 13.09.2023