

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-53-65

## ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ДІАГРАМУ КЕРОВАНOSTI

**О.М. Шумило**

к.т.н., професор кафедри

«Судові енергетичні установки та технічна експлуатація»

shumylo.alexandr@gmail.com

**В.О. Яровенко**

д.т.н., професор, завідувач кафедри

«Експлуатація судного електрообладнання та засобів автоматики»

yarovenko@3g.ua

**О.І. Зарицька**

к.т.н., доцент кафедри

«Експлуатація судного електрообладнання та засобів автоматики»

zarickayalena74@ukr.net

**Д.Ю. Криворучко**

старший викладач кафедри

«Експлуатація судного електрообладнання та засобів автоматики»

dkr5261@gmail.com

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Розглянуто вплив зміни довжини корпусу судна на його керованість і стійкість на курсі. Оцінка здійснюється за діаграмою керованості. Запропоновано спосіб розрахунку та побудови діаграми на основі математичної моделі перехідних режимів пропульсивних комплексів суден з електрорухом. Виявлено параметри, що впливають на діаграму керованості, оцінено ступінь їх впливу. Розроблено метод побудови діаграми керованості з можливістю аналізу впливу параметрів пропульсивного комплексу на маневреність. Визначено тенденції у змінах керованості суден та їх стійкість на курсі при зміні конструктивних параметрів судна. Проведено аналіз впливу зміни довжини на маневреність. Показано, що подовження судна до 0,16 його довжини несуттєво позначається на його поворотності та стійкості на курсі.

**Ключові слова:** електрохід; діаграма керованості; вплив довжини судна на керованість та стійкість на курсі.

UDC 629.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-53-65

**INFLUENCE OF ELECTRIC SHIPS' CONSTRUCTIVE PARAMETERS  
ON THE CONTROLLABILITY DIAGRAM**

**O. Shumilo**

Ph.D, Professor of the Department  
«Ship power plants and technical operation»  
shumylo.alexandr@gmail.com

**V. Yarovenko**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of  
«Operation of ship's electrical equipment and automation»  
yarovenko@3g.ua

**O. Zaritska**

Ph.D Associate Professor of the Department of  
«Operation of ship's electrical equipment and automation»  
zarickayalena74@ukr.net

**D. Krivoruchko**

senior lecturer of the department  
«Operation of ship's electrical equipment and automation»  
dkr5261@gmail.com

*Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine*

**Abstract.** *The effect of changing the length of the ship's hull on its controllability and stability on the course is considered. The assessment is carried out according to the controllability diagram. A method of calculating and constructing a diagram based on a mathematical model of transient modes of propulsive complexes of ships with electric propulsion is proposed. The parameters affecting the controllability diagram were identified, and the degree of their influence was estimated. A method of constructing a controllability diagram with the possibility of analyzing the influence of propulsion complex parameters on maneuverability has been developed. The trends in the changes in the controllability of ships and their stability on the course when the structural parameters of the ship are changed have been determined. An analysis of the effect of changing the ship length on maneuverability was carried out. It is shown that lengthening the vessel up to 0.16 of its length does not significantly affect its maneuverability and stability on the course.*

**Keywords:** *electric ship; controllability diagram; the influence of the ship's length on the controllability and stability on the course.*

**Актуальність.** При проектуванні суден з електрорухом найважливішими факторами, що визначають вибір оптимального рішення, є маневрені властивості суден та їх керованість. Необхідність в оцінці маневрених властивостей з'являється не тільки при проектуванні, але і при модернізації судна. Насамперед, це стосується модернізації, в ході якої передбачається суттєва зміна параметрів корпусу судна. Такі зміни не можуть не вплинути на керованість електрохода та його стійкість на курсі. Тому, якщо приймається рішення про доцільність зміни конструктивних параметрів корпусу, слід оцінити якою мірою змінюються при цьому маневрені характеристики судна.

Досить повне уявлення про керованість судна дає його діаграма керованості. Вона, по суті, може розглядатися як основна характеристика маневрених характеристик судна [1]. Виходячи з цього, у процесі проектування та модернізації електроходів серйозна увага має бути приділена питанням впливу параметрів судна на діаграму його керованості.

**Стан досліджуваного питання.** Питанням керованості судів присвячені численні дослідження. Насамперед, це фундаментальні роботи Р.Я. Першиця [1], Г.В. Соболева [2.], А.В. Васильєва [3] та ін. Основною метою, яку ставлять перед собою автори, є забезпечення безпеки мореплавання та зниження аварійності на флоті. Дослідження присвячені пошукам шляхів і методів вирішення завдань, щодо забезпечення необхідних маневрених якостей судна, оцінки впливу зовнішніх умов плавання на керованість суден, побудові систем автоматичного управління рухом судна.

В останні роки відбулися суттєві зміни у підході до оцінки маневрених властивостей суден. Вони зумовлені тим, що все більшу увагу стали приділяти питанням використання в суднобудуванні систем активного управління рухом [4; 5; 6]. Такі системи суттєво впливають на маневрені характеристики. Все більшу увагу приділяється питанням керованості суден з позицій побудови складних навігаційних комплексів, тренажерів, навчальних систем та комплексів [7; 8].

Аналіз цих та багатьох інших робіт, присвячених питанням керованості судна, дозволяє відзначити наступне. У всіх дослідженнях судно розглядається у відриві від його енергетичної установки. Корпус судна відокремлюється від єдиного судового пропульсивного комплексу. Автори вважають, що гребна установка працює в усталеному режимі і тяга гребних гвинтів постійна протягом усього маневру. Але, таке припущення справедливе лише на дійсно усталених режимах роботи. При маневруванні, особливо у суден з високими вимогами до маневрених властивостей, поведження судна необхідно розглядати в єдності з іншими складовими частинами пропульсивного комплексу, оскільки при маневруванні практично всі вони працюють у перехідних режимах.

Такий підхід до розв'язування різноманітних завдань з аналізу маневреності суден з електрорухом запропоновано у роботах [9;10]. З його допомогою можна проводити всебічний аналіз маневрених характеристик всіх складових пропульсивних комплексів. Проведені у цих роботах дослідження показали, що на маневрені характеристики суден з електрорухом впливають конструктивні параметри всіх складових частин комплексу. Оцінена ступінь впливу цих

параметрів, показані шляхи поліпшення маневрених характеристик електроходів за рахунок зміни параметрів комплексу. Все це дає можливість оцінити вплив на маневрені характеристики будь-якого електроходу зміни конструктивних параметрів його корпусу. Побудова такого методу і є **метою цієї роботи**.

**Основний матеріал.** Рішення поставленої задачі може бути здійснено за допомогою запропонованої в роботі [9] узагальненої математичної моделі перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів на маневрах. Модель дозволяє проводити всебічний аналіз поведінки всіх складових частин енергетичної установки і корпусу судна як при прямолінійному руху, так і на криволінійній траєкторії. За її допомогою можна розрахувати та побудувати діаграму керованості судна.

Постановка завдання дає право скористатися наближеними методами побудови діаграми керованості, що дозволяє проаналізувати (у першому наближенні) вплив на неї параметрів пропульсивного комплексу. Для побудови діаграми пропонується визначити координати кількох її точок (наприклад точок  $A, B, C, D, E$  і  $K$  на рисунку 1) і побудувати по них відповідну залежність. Перші чотири точки можна розрахувати як величини відносної кривизни траєкторії  $L/R$  ( $L$  – довжина судна,  $R$  – радіус усталеної циркуляції) при кутах перекидання пера керма відповідно в 40, 30, 20 і 10 градусів. Для отримання координат точки  $E$  судно «вводиться» в усталену циркуляцію, після чого кермо перекидається в  $0^\circ$ . Траєкторія нової циркуляції дозволяє визначити відносну кривизну траєкторії  $L/R$ , яка відповідає куту перекидання  $\beta=0$ . Параметри критичної точки  $K$  можна отримати підбором кута зворотної перекидання пера руля  $\beta_{зв.}$ , при якому електрохід виходить з усталеної циркуляції на прямий курс. Діаграма керованості може бути побудована приблизно по координатах характерних точок за допомогою, наприклад, інтерполяційних багаточленів Лагранжа або Ньютона (або з'єднанням отриманих точок плавної кривої).

Кожна точка діаграми може бути отримана шляхом розрахунку циркуляційного руху пропульсивного комплексу за допомогою математичної моделі, представленої у роботі [10], побудови траєкторії руху судна та визначення відносної її кривизни. Вплив параметрів пропульсивних комплексів на діаграму керованості може бути, при цьому, приблизно ототожнено з їх впливом на координати характерних точок діаграми  $A, B, C, D, E$  і  $K$ .

У роботі [9] показано, що на параметри руху пропульсивних комплексів електроходів, а також і на діаграму керованості, впливає кілька десятків узагальнених безрозмірних параметрів комплексу. Отже, на першому етапі доцільно виявити з усієї цієї сукупності ті параметри, вплив яких є суттєвим. Серії експериментів, проведених методом випадкового балансу, дозволили виділити параметри, які істотно впливають на діаграму керованості. Ними виявилися узагальнені безрозмірні параметри

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

$$C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0}; \quad C_{65} = \frac{2 \left[ 0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0}^{\omega} \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0},$$

де  $L$  – довжина судна;

$P_0$  – сумарний упор гребних гвинтів;

$m$ ,  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{22}$  – маса судна та приєднані маси води вздовж поздовжньої та поперечної осі судна;

$v_0$  – швидкість руху судна в усталеному режимі роботи при номінальній потужності гребних електродвигунів;

$C_Y^{\beta}$  – коефіцієнт сили корпусу;

$F_D$  – наведена площа зануреної частини діаметральної площини судна;

$\rho$  – питома щільність води;

$m_1$  – коефіцієнт позиційного моменту опору;

$C_{m0}^{\omega}$  – коефіцієнт демпфуючого моменту опору.

Регресійний аналіз дав можливість проаналізувати параметри та ефекти взаємодій параметрів за ступенем їхнього впливу на діаграму керованості. Вклади перерахованих параметрів у величину відносної кривизни траєкторії становлять: для  $N_X$  – 43,8 %; для  $C_{\lambda 21}$  – 17,9 %; для  $C_{61}$  – 8,8 %; для  $C_{21}$  – 8 %; для  $C_{65}$  – 5,8 %. Істотними ефектами взаємодій параметрів виявилися  $N_X C_{\lambda 21}$  – 5,8 %,  $N_X C_{61}$  – 3,2 %,  $C_{\lambda 21} C_{61}$  – 3,2 %.

Оскільки діаграма керованості будується за координатами характерних точок  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  і  $K$ , то є сенс визначити вплив знайдених істотних параметрів на координати саме цих точок. Розв'язання цього завдання дає можливість побудувати діаграму керованості для будь-якого електроходу (розглянутого класу) і проаналізувати характер її зміни в ході параметричної оптимізації комплексів. Іншими словами, необхідно побудувати аналітичні залежності координат точок  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  і  $K$  від істотно значущих параметрів  $N_X$ ;  $C_{\lambda 21}$ ;  $C_{61}$ ;  $C_{21}$ ;  $C_{65}$ .

Розв'язання цього завдання здійснено методами повного факторного експерименту із залученням методів центрального композиційного планування (попередні дослідження показали, що залежність відносної кривизни траєкторії від параметрів комплексу нелінійна, і необхідно враховувати квадратичні члени). Нижче представлені результати таких розрахунків стосовно електроходів з одним з перспективних варіантів гребної установки – на базі частотно-керованих асинхронних гребних електродвигунів.

За допомогою серії чисельних експериментів (проведених за спеціально розробленими матрицями планування експериментів) отримані аналітичні залежності координат характерних точок діаграми керованості від різних значень безрозмірних параметрів комплексів. Ці залежності отримані для значень кута перекладки пера керма  $\beta$  у  $40^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $10^\circ$  і  $0^\circ$ :

$$(L/R)_{\beta=40} = 0,501 - 0,231N_X + 0,075C_{\lambda_{21}} - 0,038C_{61} - 0,036C_{65} + \quad (1)$$

$$(L/R)_{\beta=30} = 0,446 - 0,226N_X + 0,068C_{\lambda_{21}} - 0,040C_{61} - 0,034C_{65} + \\ + 0,075N_X^2 - 0,029N_X C_{\lambda_{21}}; \quad + 0,077N_X^2 - 0,035N_X C_{\lambda_{21}}; \quad (2)$$

$$(L/R)_{\beta=30} = 0,446 - 0,226N_X + 0,068C_{\lambda_{21}} - 0,040C_{61} - 0,034C_{65} + \\ + 0,075N_X^2 - 0,029N_X C_{\lambda_{21}}; \quad (3)$$

$$(L/R)_{\beta=10} = 0,287 - 0,246N_X + 0,07C_{\lambda_{21}} - 0,039C_{61} - 0,016C_{21} - 0,031C_{65} + \\ + 0,091N_X^2 - 0,043N_X C_{\lambda_{21}} + 0,016N_X C_{61} + 0,018N_X C_{65}; \quad (4)$$

$$(L/R)_{\beta=0} = 0,130 - 0,267N_X + 0,064C_{\lambda_{21}} - 0,035C_{61} - 0,019C_{21} - \\ - 0,026C_{65} + 0,114N_X^2 + 0,008C_{\lambda_{21}}^2 - 0,054N_X C_{\lambda_{21}} + \\ + 0,024N_X C_{61} + 0,006N_X C_{21} + 0,025N_X C_{65} + 0,007C_{61} C_{21}. \quad (5)$$

$$\beta_{кр} = 0,024 - 0,207N_X + 0,034C_{\lambda_{21}} - 0,014C_{61} - 0,026C_{21} - 0,021C_{65} + 0,142N_X^2 + \\ + 0,003C_{\lambda_{21}}^2 - 0,001C_{61}^2 - 0,001C_{21}^2 - 0,006C_{65}^2 - 0,04N_X C_{\lambda_{21}} + 0,014N_X C_{61} + \\ + 0,032N_X C_{21} + 0,028N_X C_{65} - 0,015C_{\lambda_{21}} C_{61} + 0,006C_{\lambda_{21}} C_{21} + 0,005C_{\lambda_{21}} C_{65} - \\ - 0,005C_{61} C_{21} - 0,006C_{61} C_{65} + 0,016C_{21} C_{65} \quad (6)$$

$$(L/R)_{\beta=\beta_{кр}} = 0,066 - 0,114N_X + 0,026C_{\lambda_{21}} - 0,017C_{61} - 0,008C_{21} - \\ - 0,012C_{65} + 0,036N_X^2 + 0,005C_{\lambda_{21}}^2 + 0,007C_{65}^2 - 0,021N_X C_{\lambda_{21}} + \\ + 0,010N_X C_{61} + 0,009N_X C_{65} + 0,005C_{\lambda_{21}} C_{61} - 0,005C_{21} C_{65}. \quad (7)$$

Для побудови діаграми керованості будь-якого конкретного електроходу з розглянутим типом електроенергетичної установки достатнє підставити чисельні значення безрозмірних параметрів комплексу  $N_X$ ,  $C_{\lambda_{21}}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{61}$ ,  $C_{65}$  (які розраховані за наведеними вище формулам) у рівняння (1)-(7) і результатами розрахунку побудувати відповідні діаграми  $L/R = f(\beta)$ .

У рівняннях (1)-(7) використано нормоване уявлення значень параметрів, що входять до них. Нормування здійснюється за співвідношенням

$$A_j^n = (A_j - A_{j0}) / \Delta A_j,$$

де  $A_j$  – значення  $j$ -го параметра;

$A_j^n$  – нормоване значення  $j$ -го параметра;

$A_{j0}$  – середнє значення  $j$ -го параметра;

$\Delta A_j = A_{j\max} - A_{j0} = A_{j0} - A_{j\min}$  – інтервал зміни значень  $j$ -го параметра (відповідно з проведеними дослідженнями, можливий діапазоні зміни значень параметрів:

$$N_X = 0,06 \dots 0,20; \quad C_{\lambda_{21}} = 0,65 \dots 1,25; \quad C_{61} = 2 \dots 8; \quad C_{21} = 3 \dots 10; \quad C_{65} = 4 \dots 5).$$

Для наближеної оцінки діаграми керованості електроходів з асинхронними частотно-керованими гребними електродвигунами на рисунку 1 наведено невелику серію діаграм з різними співвідношеннями значень параметрів  $N_X$ ,  $C_{\lambda_{21}}$  при фіксованих значеннях параметрів  $C_{61}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{65}$ .

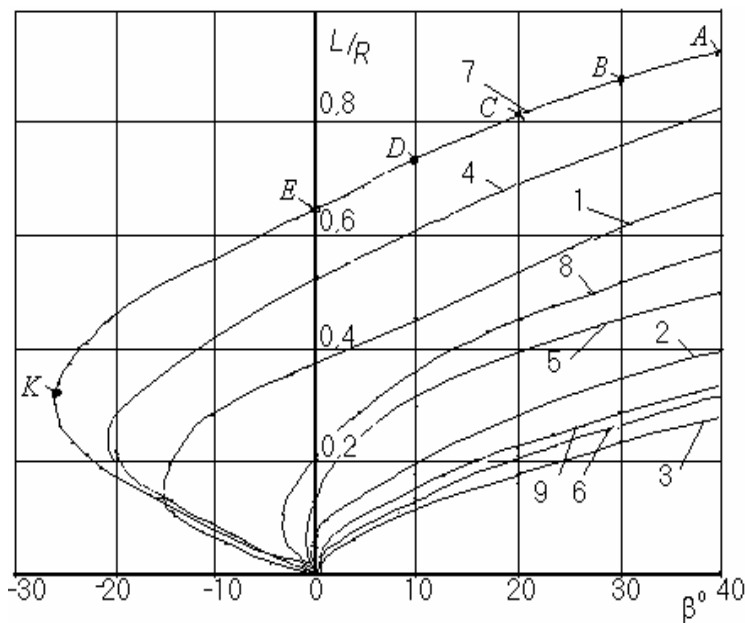


Рис. 1. Діаграми керованості електроходів при різних співвідношеннях параметрів  $N_X$ ,  $C_{\lambda_{21}}$

Криві на рисунку 1 відповідають: 1 –  $N_X = 0,06$ ;  $C_{\lambda 21} = 0,07$ ; 2 –  $N_X = 0,12$ ;  $C_{\lambda 21} = 0,07$ ; 3 –  $N_X = 0,2$ ;  $C_{\lambda 21} = 0,07$ ; 4 –  $N_X = 0,06$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,0$ ; 5 –  $N_X = 0,12$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,0$ ; 6 –  $N_X = 0,2$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,0$ ; 7 –  $N_X = 0,06$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,3$ ; 8 –  $N_X = 0,12$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,3$ ; 9 –  $N_X = 0,2$ ;  $C_{\lambda 21} = 1,3$ . Чисельні значення інших параметрів залишалися рівними своїм середнім значенням  $A_{j0}$ .

Щоб скористатися результатами, наведеними на рисунку 1, достатньо розрахувати значення відповідних безрозмірних параметрів, та вибрати відповідну криву (при значеннях параметрів, відмінних від наведених на рисунку, можна скористатися будь-якими інтерполяційними методами).

Результати проведених досліджень показали, що найбільший вплив на діаграму керованості має так звана енергоозброєність електроходу  $N_X$ . (Це є додатковим обґрунтуванням необхідності аналізу маневрених характеристик електроходів у єдності з іншими складовими частинами комплексу). Як очевидно з рисунка 1, її зниження веде до зростання поворотності електроходу ( $(L/R)_{\max}$  – зростає). У той же час, судно стає менш стійким на курсі, і при великих значеннях  $C_{\lambda 21}$  (і до того ж малих значеннях  $N_X$ ) може виявитися некерованим. Зі зростанням  $N_X$  електрохід стає стійкішим на курсі (щоправда, менш поворотним), а діаграма керованості виявляється слабо залежною від інших параметрів комплексу. Вплив інших параметрів енергетичних установок суттєво слабкіший і при їх варіюванні (у зазначених діапазонах) можна не побоюватися за суттєву зміну діаграми керованості електрохода.

Отримані аналітичні залежності дозволяють аналізувати вплив зміни параметрів пропульсивних комплексів електроходів на їх керованість. Скористаємося розглянутою методикою з метою оцінки впливу конструктивних параметрів корпусу судна на діаграму керованості. Подібні завдання неминуче виникають при зміні конструктивних параметрів судна під час його модернізації. Зокрема, для пасажирських суден одним із перспективних напрямів їхньої модернізації є збільшення довжини судна. Це дає можливість суттєво збільшити кількість пасажирів та підвищити тим самим рентабельність судна. Перед проведенням подібної перебудови, цілком природно, виникає потреба в оцінці зміни керованості модернізованого судна.

Довжина судна впливає на велику кількість параметрів комплексу. Але, на попередніх етапах розрахунку, при обмеженому обсязі інформації, немає сенсу враховувати зміни малозначимих параметрів. За результатами експериментів, які відсівають, були виявлені параметри, вплив яких на діаграму керованості найбільш суттєвий. Це – перераховані вище  $N_X$ ,  $C_{\lambda 21}$ ,  $C_{61}$  и  $C_{21}$ . Вплив зміни значень інших параметрів менш, ніж 3 %, і на попередніх етапах оцінки керованості суден їх можна приймати не варіюваними.

Подовження судна здійснюється вставками певної довжини. Проаналізуємо вплив довжини вставки на діаграму. Для цього розглянемо вставки завдовжки:  $L_1 = 0,08L$ ;  $L_1 = 0,10L$ ;  $L_1 = 0,12L$ ;  $L_1 = 0,16L$ .



В аналітичних залежностях відносної кривизни траєкторії ( $L/R$ ) від значень безрозмірних параметрів комплексів (1)-(7) використано нормовані значення параметрів. Мінімальні  $A_{j\min}$ , середні  $A_{j0}$ , максимальні чисельні значення  $A_{j\max}$  безрозмірних параметрів  $N_X$  і  $A_{j0}$ , та діапазони зміни їх значень  $\Delta A_j$  наведено у табл. 1. Тут же наведено нормовані значення цих параметрів при довжинах вставки  $L_1$  відповідно  $0,08L - (A_{j1}^n)$ ;  $0,10L - (A_{j2}^n)$ ;  $0,12L - (A_{j3}^n)$ ;  $0,16L - (A_{j4}^n)$ . Нормування здійснено відповідно до описаної вище процедури.

Таблиця 1

Значення безрозмірних параметрів

Параметр	Значення параметрів							
	$A_{j\min}$	$A_{j0}$	$A_{j\max}$	$\Delta A_j$	$A_{j1}^n$	$A_{j2}^n$	$A_{j3}^n$	$A_{j4}^n$
$N_X$	0,06	0,13	0,20	0,07	-0,143	-0,186	-0,223	-0,297
$C_{\lambda 21}$	0,65	0,95	1,25	0,3	-0,253	-0,317	-0,380	-0,507
$C_{61}$	2	5	8	3	+0,148	+0,185	+0,223	+0,297
$C_{21}$	3	6,5	10	3,5	+0,133	+0,166	+0,200	+0,266

Для розрахунку відносної кривизни траєкторії при зміні параметрів комплексу, необхідно в рівняння (1)-(7) підставити чисельні значення (у нормованому вигляді) значущих параметрів  $N_X$ ,  $C_{\lambda 21}$ ,  $C_{61}$  і  $C_{21}$ . Значення інших параметрів та ефектів взаємодії параметрів незмінні, тому в нормованому вигляді ці значення будуть нульовими. Виходячи з цього, складові правих частин рівнянь (1)-(7), що містять ці параметри будуть опущені. Як приклад, нижче наведено результати розрахунків при довжині вставки  $L_1 = 0,08L$ .

Відносна кривизна траєкторії:

$$(L/R)_{\beta=40} = 0,501 - 0,231N_X + 0,075C_{\lambda 21} - 0,038C_{61} = \\ = 0,501 - 0,231(-0,143) + 0,075(-0,253) - 0,038(0,148) = 0,515;$$

$$(L/R)_{\beta=30} = 0,446 - 0,226N_X + 0,068C_{\lambda 21} - 0,040C_{61} = \\ = 0,446 - 0,226(-0,143) + 0,068(-0,253) - 0,040(0,148) = 0,461;$$

$$(L/R)_{\beta=20} = 0,371 - 0,233N_X + 0,066C_{\lambda 21} - 0,039C_{61} = \\ = 0,371 - 0,233(-0,143) + 0,066(-0,253) - 0,039(0,148) = 0,388;$$

$$(L/R)_{\beta=10} = 0,287 - 0,246N_X + 0,07C_{\lambda 21} - 0,039C_{61} - 0,016C_{21} = \\ = 0,287 - 0,246(-0,143) + 0,07(-0,253) - 0,039(0,148) - 0,016(0,133) = 0,304;$$

$$(L/R)_{\beta=0} = 0,130 - 0,267N_X + 0,064C_{\lambda 21} - 0,035C_{61} - 0,019C_{21} = \\ = 0,130 - 0,267(-0,143) + 0,064(-0,253) - 0,035(0,148) - 0,019(0,133) = 0,149.$$

Параметри критичної точки

$$\beta_{(KP)} = 0,024 - 0,207N_X + 0,034C_{\lambda 21} - 0,014C_{61} - 0,026C_{21} = \\ = 0,024 - 0,207(-0,143) + 0,034(-0,253) - 0,014(0,148) - 0,026(0,133) = 0,041;$$

$$(L/R)_{\beta=\beta(KP)} = 0,066 - 0,114N_X + 0,026C_{\lambda 21} - 0,017C_{61} - 0,008C_{21} = \\ = 0,066 - 0,114(-0,143) + 0,026(-0,253) - 0,017(0,148) - 0,008(0,133) = 0,075$$

Таблиця 2

Параметри характерних точок діаграми керованості

Довжина вставки		Відносна кривизна $(L/R)\beta$					Параметри критичної точки	
		$\beta = 40^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta_{кр}$	$(L/R)_{\beta_{кр}}$
1	0	0,501	0,446	0,371	0,287	0,130	-0,024	0,066
2	0,08 L	0,515	0,461	0,388	0,304	0,149	-0,041	0,075
3	0,10 L	0,520	0,466	0,393	0,310	0,160	-0,047	0,079
4	0,12 L	0,524	0,470	0,398	0,315	0,164	-0,051	0,082
5	0,16 L	0,532	0,478	0,407	0,325	0,171	-0,060	0,087

За результатами розрахунків на рисунку 2 побудовані діаграми керованості при різній довжині вставки. Крива 1 відповідає довжині судна до модернізації, крива 2 – довжині вставки  $L_1 = 0,08L$ , крива 3 – довжині вставки  $L_1 = 0,10L$ , крива 4 – довжині вставки  $L_1 = 0,12L$ , крива 5 – довжині вставки  $L_1 = 0,16L$ .

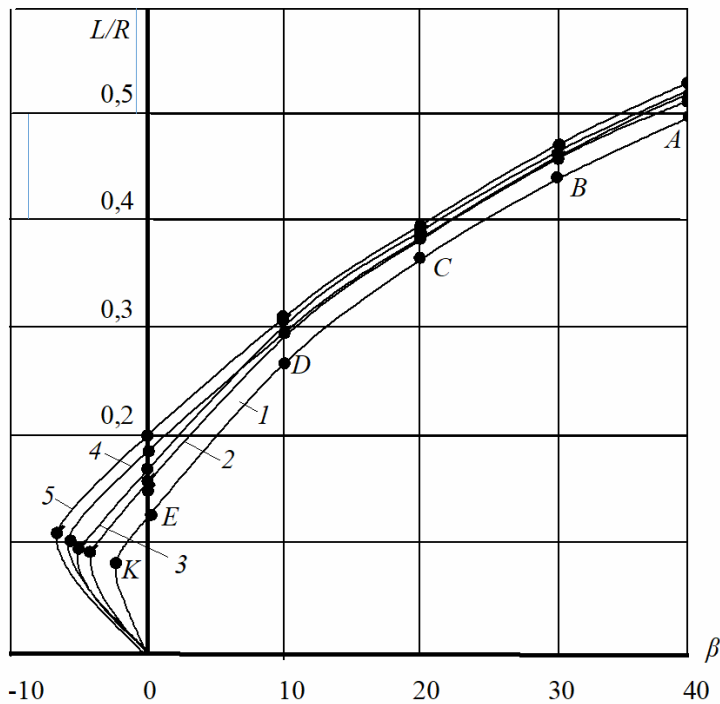


Рис. 2. Діаграми керованості електроходів при різній довжині вставки

Аналіз кривих показує таке. Подовження судна в діапазоні від  $L_1 = 0,08L$  до  $L_1 = 0,16L$  незначно впливає на його керованість. Максимальне збільшення відносної кривизни траєкторії ( $L/R$ ) при максимальному значенні кута повороту пера керма не перевищує 6 % (збільшується від 0,501 до 0,532). Приблизно таке ж співвідношення у зміні кривизни зберігається і для менших кутів повороту. Суттєвіше збільшення довжини позначається на параметрах критичної точки. Вона зміщується в область більших значень критичного кута повороту і, відповідно, більших значень відносної кривизни траєкторії.

Однак ці зміни незначні. Це пояснюється тим, що невелике зниження енергоозброєності судна (зменшення величини  $N_X$ ), яке веде до зростання його поворотності, компенсується збільшенням співвідношення між приєднаними масами води вздовж поперечної осі (коефіцієнт  $\lambda_{22}$ ) і поздовжньої (коефіцієнт  $\lambda_{11}$ ) осі судна (частка поперечних приєднаних мас зростає). Це зменшує величину безрозмірного параметра  $C_{\lambda_{21}}$ , що веде до невеликого зростання критичного кута повороту  $\beta_{кр}$ .

Отже, вплив збільшення довжини судна на його поворотність і стійкість на курсі є несуттєвим і при зміні довжини у розглянутих межах можна вважати, що судно залишається керованим з такою самою поворотністю, як і прототип.

### Висновки

1. Запропоновано метод оцінки впливу зміни конструктивних параметрів корпусу судна на його діаграму керованості.
2. Збільшення довжини пасажирських суден в діапазоні 0,08-0,16 від їх довжини несуттєво позначається на їх поворотності і стійкості на курсі, що свідчить про відсутність заперечень проти такої модернізації з точки зору погіршення маневрених характеристик суден.
3. Для більш детального дослідження маневрених характеристик судна рекомендується скористатися повною математичною моделлю перехідних режимів пропульсивного комплексу на маневрах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Перици Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.*
2. *Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. – Л.: Судовождение, 1976. – 478 с.*
3. *Васильев А.В. Управляемость судов: Учебное пособие. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.*

4. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. *Multi-objective optimization of a bow thruster based on URANS numerical simulations. Ocean Engineering*, 2022, vol. 247(4):110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
5. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Ping Wang. *An experimental and numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the bow thruster. Ocean Engineering*, 2020, vol. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107348.
6. 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.
7. Kupraty O.. *Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, June 2021, pp. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
8. Jarosław Artyśzuk and Paweł Zalewski. *Energy Savings by Optimization of Thrusters Allocation during Complex Ship Manoeuvres. Energies*. 2021, 14(16), 4959; doi: 10.3390/en 14164959.
9. Яровенко В.А. *Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. - Одесса: Маяк, 1999. - 188 с.*
10. Яровенко В.А. *Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов / В.А. Яровенко, П.С. Черников // Электротехника і електромеханіка. – 2017. – № 6. С. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05*

#### REFERENCE

1. Pershits R.YA. (1983) *Upravlyayemost' i upravleniye sudnom [Ship control and management]. Leningrad: Sudostroenie. (in Russian).*
2. Sobolev G.V. (1976) *Upravlyayemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya [Ship controllability and navigation automation.]. Leningrad: Sudostroenie. (in Russian).*
3. Vasil'yev A.V. (1989) *Upravlyayemost' sudov [Ship Handling]: Uchebnoye posobiye. Leningrad: Sudostroenie. (in Russian).*
4. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. (2022) *Multi-objective optimization of a bow thruster based on URANS numerical simulations. Ocean Engineering*, vol. 247(4):110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
5. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Ping Wang. (2020) *An experimental and numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the bow thruster. Ocean Engineering*, vol. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng. 107348.

6. *Teresa Abramowicz-Gerigk, Miroslaw 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.*
7. *Kupraty O. Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. Scientific Journal of Gdynia Maritime University, No. 118, June 2021, pp. 7-23. doi: 10.26408/118.01.*
8. *Jarostaw Artyszuk and Pawel Zalewski. Energy Savings by Optimization of Thrusters Allocation during Complex Ship Manoeuvres. Energies 2021, 14(16), 4959; doi: 10.3390/en14164959.*
9. *Yarovenko V.A. (1999) Raschet i optimizatsiya perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov. [Calculation and optimization of transient modes of propulsion complexes of electric ships] - Odessa: Mayak, (in Ukraine).*
10. *Yarovenko V.A. (2017) Metod rascheta perekhodnykh rezhimov grebnykh elektroenergeticheskikh ustanovok elektrokhodov [Method for calculating transient modes of propulsion electric power plants of electric ships] / V.A. Yarovenko, P.C. Chernikov// Yelektrotehnika i yelectromekhanika. – № 6. P. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05*

*Стаття надійшла до редакції 06.03.2023*

**Посилання на статтю: Шуміло О.М., Яровенко В.О., Зарицька О.І., Криворучко Д.Ю.** Вплив конструктивних параметрів електроходів на діаграму керованості. // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 1 (68). С. 53-65. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-1-53-65.

*Article received 06.03.2023*

**Reference a JournalArtic: Shumilo O., Yarovenko V., Zaritska O., Krivoruchko D.** Influence of electric ships' constructive parameters on the controllability diagram // Herald of the Odessa national maritime university. Coll. scient. works, 2023, . № 1 (68). 53-65. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-1-53-65.