

УДК 629.5.01:658:338
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).1](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).1)

TO CALCULATION OF A TRAJECTORY OF THE MOVEMENT OF THE VESSEL ON THE UNSTEADY CIRCULATION

ДО РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СУДНА НА НЕСТАЛІЙ ЦИРКУЛЯЦІЇ

Anatoliy Ya. Kazariezov^{1,2}
KazariezovAnatoli1950@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8586-5596

Yuriy M. Pashchenko¹
yurii.pashchenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8307-0316

А.Я. Казарезов^{1,2},
докт. техн. наук, професор

Ю.М. Пашченко¹,
канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv¹
Mykolaivsky Scientific and Recentexpert-Criminalistic Center, Mykolaiv²*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв¹
Миколаївський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр, м. Миколаїв²*

Abstract. In the work, nonlinear and linearized methods of calculating the trajectory of the ship's movement at the evolutionary stage of circulation are considered. Comparative calculation characteristics of the evolutionary period of circulation, depending on the method of calculating the ship's movement, are given.

It has been proven that the statement of a number of authors about the significant discrepancy between the ship's trajectories calculated by non-linear and linearized schemes for the evolutionary period of movement is not true. The comparison performed by the mentioned authors can be evaluated as a comparison of two trajectories for the same period of time. However, in one case, the evolutionary stage of the ship's movement is taken into account, and in the second, a component of two stages – the evolutionary stage and the established circulation stage.

The possibility of using the linearized method for calculating the trajectory of the ship at the evolutionary stage of circulation is shown. With weak maneuvers of the ship, the trajectories of movement, calculated according to nonlinear and linearized schemes, coincide with practical accuracy. However, there is one qualitative difference – when calculating according to the linearized scheme, there is no reverse displacement of the ship's center of gravity. For weak maneuvers of the ship, the discrepancy in the coordinates of the trajectories does not exceed 3%, which is acceptable for practical calculations.

It was established that the increase in the differences in the coordinates of the trajectory calculated according to the linearized scheme from the trajectory calculated according to the nonlinear scheme is smooth and allows predicting the magnitude of the error, since the calculation according to the linearized scheme always tends to lag behind the calculation according to the nonlinear scheme.

It is shown that the calculation of the ship's trajectory on evolution according to a linearized scheme has a discrepancy between the drift angle and angular velocity at the end of evolution with the values of these parameters for a steady circulation, which is not a significant drawback for constructing a trajectory.

Recommendations for calculating the ship's trajectory at the stage of evolutionary circulation are proposed. The time of the evolutionary process for a linearized scheme should be taken equal, as for a non-linear scheme – 6 dimensionless units. The recommendations may be useful to engineers, enterprises and organizations that calculate the maneuvering characteristics of ships.

Key word: vessel; maneuverable characteristics; evolutionary period of circulation; a trajectory of the movement of the vessel on circulation; nonlinear method; the linearized method.

Анотація. У роботі розглянуто нелінійний та лінеаризований методи розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції. Наведено порівняльні розрахункові характеристики еволюційного періоду циркуляції, залежно від методу розрахунку руху судна.

Доведено, що твердження ряду авторів про значну розбіжність траєкторій судна, розрахованих за нелінійною та лінеаризованою схемами, для еволюційного періоду руху, не відповідає дійсності. Виконане, згаданими

авторами, порівняння можна оцінити як зіставлення двох траєкторій для одного й того ж проміжку часу. Однак, в одному випадку береться до уваги еволюційний етап руху судна, а в другому складова з двох етапів – еволюційного етапу та етапу циркуляції, що встановилася.

Показана можливість використання лінеаризованого методу для розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції. При слабких маневрах судна траєкторії руху, розраховані за нелінійною та лінеаризованими схемами, з практичною точністю збігаються. Однак присутня одна якісна відмінність – при розрахунку за лінеаризованою схемою відсутнє зворотнє зміщення центру тяжіння судна. Для слабких маневрів судна розбіжність у координатах траєкторій не перевищує 3%, що прийнятне для практичних розрахунків.

Встановлено, що наростання відмінностей у координатах траєкторії, що розрахована за лінеаризованою схемою, від траєкторії, розрахованої за нелінійною схемою – плавний і дозволяє прогнозувати величину помилки, так як розрахунок за лінеаризованою схемою завжди дає тенденцію у бік відставання від розрахунку за нелінійною схемою.

Показано, що при розрахунку траєкторії руху судна на еволюції за лінеаризованою схемою спостерігається розбіжність кута дрейфу та кутової швидкості судна наприкінці періоду еволюції зі значеннями цих параметрів на циркуляції, яка встановилася, що для побудови траєкторії не є істотним недоліком.

Запропоновано рекомендації щодо розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції. Час еволюційного процесу для лінеаризованої схеми слід приймати рівним, як і для нелінійної схеми – 6 безрозмірним одиницям. Рекомендації можуть бути корисні інженерам, підприємствам та організаціям, які здійснюють розрахунки маневрених характеристик суден.

Ключові слова: судно; маневрені характеристики; еволюційний період циркуляції; траєкторія руху судна на циркуляції; нелінійний метод; лінеаризований метод.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розрахунок траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції цікавить дослідників та конструкторів як на етапі проектування судна під час прогнозування маневрених характеристик, так і у процесі експлуатації судна для вирішення завдань маневрування судна.

У роботі здійснено спробу на прикладі конкретного судна показати можливість застосування лінеаризованого методу розрахунку траєкторії на еволюційному етапі циркуляції судна. Пропонується підхід до використання лінеаризованого методу розрахунку, що дозволяє отримати точність у побудові траєкторії судна на еволюційному етапі циркуляції, порівняну з точністю нелінійного методу. При цьому вдається уникнути складнощів, притаманних нелінійному методу розрахунку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Методика розрахунку траєкторії руху судна на несталій циркуляції з урахуванням нелінійності гідродинамічних характеристик, що розроблена Р.Я. Першицем, викладена у довідковій літературі [1, с. 339; 3, с. 584]. У диференціальних рівняннях руху судна розглядається нелінійна залежність бічної сили, що діє на корпус судна, від кута дрейфу. Порядок та приклади розрахунку елементів руху судна з урахуванням нелінійності гідродинамічних характеристик викладено в [1, с. 341; 3, с. 586].

При вирішенні системи рівнянь руху судна приймають миттєву перекладку керма та використовують наближену залежність швидкості ходу судна [1, с. 332; 2, с. 107]. Зазначений прийом дозволяє систему трьох диференціальних рівнянь звести до системи двох рів-

нянь – для змінних: кута дрейфу та кутової швидкості обертання судна. Третє рівняння, що визначає швидкість руху судна, вирішується окремо.

Методика розрахунку параметрів руху судна на несталій циркуляції, за лінеаризованими рівняннями викладена в [1, с. 325; 2, с. 96; 3, с. 564]. У рівняннях руху розглядається лінеаризована залежність бічної сили, що діє корпус судна, від кута дрейфу судна. Порядок і приклад розрахунку елементів руху судна за лінеаризованими рівняннями викладені в [1, с. 332; 3, с. 571], порядок розрахунку елементів руху судна за лінеаризованими рівняннями викладено в [2, с. 102].

Методика розрахунку траєкторії руху судна на несталій циркуляції з урахуванням нелінійності гідродинамічних характеристик порівняно з лінеаризованою методикою не позбавлена низки недоліків, деякі з яких суттєво ускладнюють використання методики для практичних розрахунків. Порівняння між собою методик розрахунку руху судна на несталій циркуляції, наведено в [4, с. 356]. Однак вказане порівняння містить ряд недоліків, які будуть розглянуті нижче.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Невирішеною частиною проблеми є відсутність об'єктивної порівняльної оцінки між результатами застосування нелінійного та лінеаризованого методів розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження спрямоване на оцінку допустимості меж застосування лінеаризованого методу розрахунку замість нелінійного методу для розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження, використані в роботі, поділяються на загальнонаукові та спеціальні. До загальнонаукових методів належать методи: порівняння, аналізу, синтезу. До спеціальних методів належать методи: числового розв'язку системи диференціальних рівнянь, графічної побудови числових результатів, підбору форми алгебраїчних рівнянь для встановлення залежності у перехідних процесах.

Об'єктом дослідження є процес порівняння траєкторій руху судна на еволюційному етапі циркуляції судна, які розраховані за лінеаризованим та нелінійним методами.

Предметом дослідження є лінеаризований та нелінійний методи розрахунку руху маневрених характеристик судна на еволюційному етапі циркуляції.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Автори методик у першому та другому виданні довідника однозначно вказують на точність нелінійної методики та незастосовність лінеаризованої методики для практичних розрахунків. Як основний аргумент в обох випадках наводиться малюнок траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції. На рис. 1 відтворено цей малюнок відповідно до [1, с. 347].

Траєкторії руху судна представлені на рис. 1, дійсно значною мірою різняться між собою. Проте висновок авторів довідника нетакий вже і однознач-

ний. Розглянемо особливості побудови кожної із траєкторій.

Траєкторія руху судна на еволюції, розрахована за лінеаризованою методикою, побудована за даними [1, с. 338, табл. 5]. Безрозмірний час еволюційного періоду становить 16 одиниць. Траєкторія відповідає лише еволюційному періоду.

Траєкторія руху судна на еволюції, розрахована за нелінійною методикою, побудована за даними [1, с. 347, табл. 8]. Безрозмірний час еволюційного періоду становить 6 одиниць. Решта траєкторії, починаючи з часу в 6 одиниць і до 16 одиниць, побудована за формулами для руху судна на циркуляції, що впливає з розгляду [1, с. 347, табл. 8]. У табл. 8 кутова швидкість, швидкість ходу, кут дрейфу судна, починаючи з часу, щорівнює 6 одиницям і до моменту часу рівного 16 одиницям, є постійними величинами [1, с. 347, табл. 8]. Траєкторія в даному випадку відповідає двом періодам – еволюційному періоду циркуляції та періоду руху судна на циркуляції, що встановилася.

Таким чином, авторами довідника на рис. [1, с. 347] виконано порівняння двох траєкторій руху, одна з яких відноситься тільки до еволюційного періоду, а інша траєкторія побудована для двох періодів циркуляції – еволюційного та того, що встановився. Виконане порівняння можна оцінити як співвідношення двох траєкторій для того самого проміжку часу в 16 одиниць, а не для еволюційного періоду руху судна на циркуляції. В опису до цього рисунку

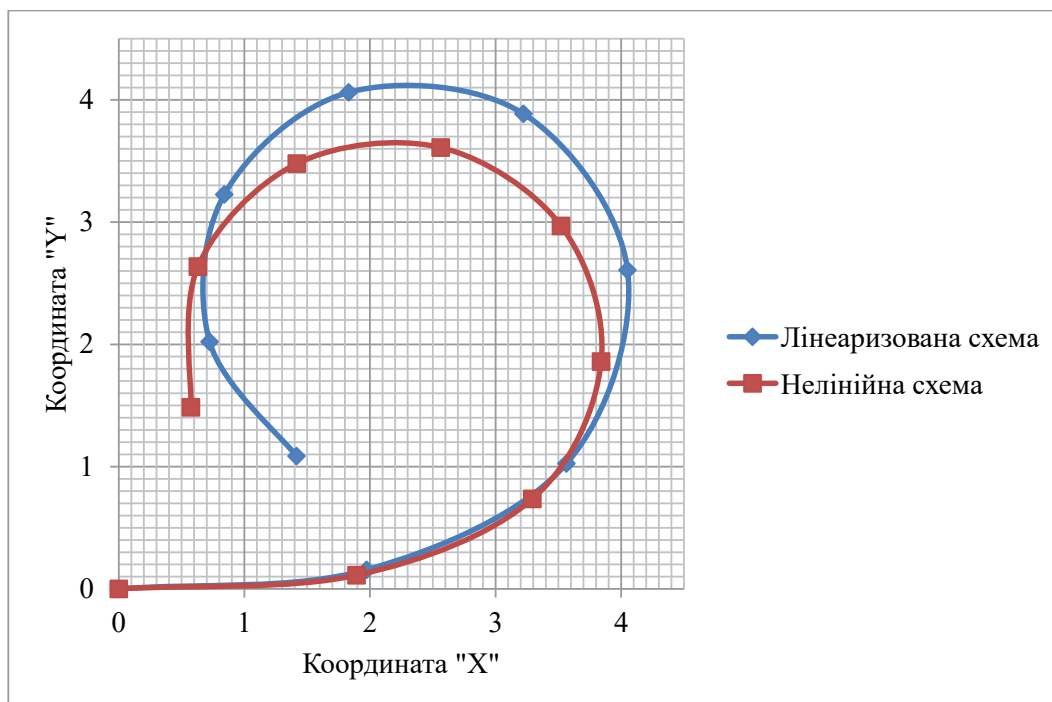


Рис. 1. Траєкторії руху судна, розраховані за нелінійною та лінеаризованою схемами, час руху складає 16 відносних одиниць

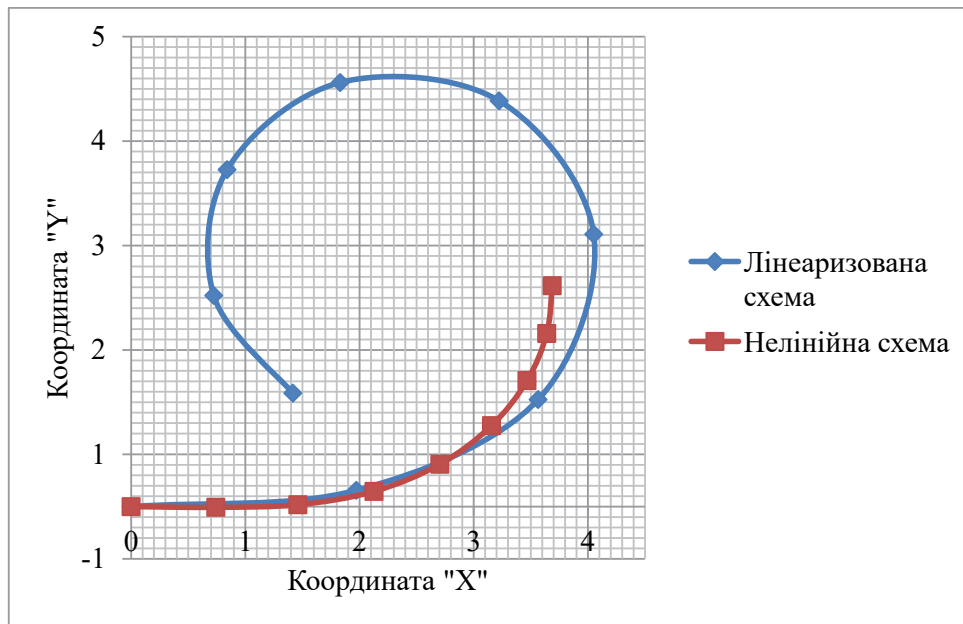


Рис. 2. Траєкторії руху судна в еволюційному періоді, розраховані за нелінійною та лінеаризованою схемами при тривалості еволюції у 6 та 16 безрозмірних одиниць відповідно

декларується зіставлення траєкторій для еволюційного періоду руху судна, що не відповідає дійсності.

Для порівняння траєкторій руху судна на еволюції, розрахованих за різними схемами, необхідно виконати деякі перетворення. Відкинемо частину траєкторії, розрахованої за нелінійною методикою, яка відповідає руху судна на етапі, що встановився. Тоді співвідношення траєкторій, наведених на рис. 2, виглядає принципово інакше, ніж на мал. 1.

Отримане співвідношення траєкторій пояснюється тим, що для лінеаризованої схеми тривалість у часі еволюційного етапу циркуляції становить 16 одиниць, а нелінійної схеми розрахунку – 6 одиниць. Зважаючи на те, що траєкторії побудовані в однакових умовах для одного судна на етапі еволюції, різна тривалість етапу в часі викликає сумнів у коректності підходу при порівнянні двох методів розрахунку еволюційного періоду руху судна.

Особливості реалізації методики на еволюційному етапі циркуляції з урахуванням нелінійності гідродинамічних характеристик полягають у наступному. Розрахунок параметрів руху судна провадиться з кроком по куту дрейфу. Розрахунки кутової швидкості та траєкторії руху судна провадиться з кроком за часом, що вимагає перебудови залежності кута дрейфу від часу при побудові траєкторії руху судна. При цьому безрозмірний час еволюційного етапу циркуляції задається перед виконанням розрахунку відповідно до рекомендацій Г.Є. Павленка [5, с. 160; 1, с. 332; 2, с. 101]. За умови миттєвої перекладки керма рекомендується приймати у розрахунках безрозмірний час еволюційного етапу циркуляції судна рівним 6 одиницям.

Методика розрахунку параметрів руху судна на етапі несталої циркуляції за лінеаризованими рівняннями має свої особливості. Розрахунок проводиться з кроком за часом і не вимагає перебудови залежності кута дрейфу і кутової швидкості від часу при побудові траєкторії руху судна на відміну від нелінійної методики. Час еволюційного етапу циркуляції визначається шляхом послідовних наближень. Послідовність, як вказує досвід практичних розрахунків, досить швидко збігається. Момент завершення етапу еволюції відповідає моменту досягнення кутом дрейфу судна значення, яке відповідає куту дрейфу на циркуляції, що встановилася [4, с. 356]. За умови миттєвої перекладки керма у прийнятому для прикладу випадку безрозмірний час еволюційного етапу циркуляції для конкретного судна дорівнює 16 одиницям [1, табл. 5, с. 337].

Час еволюційного етапу циркуляції судна відіграє важливу роль. У більш ранньому виданні «Довідника ...» [3, с. 593] вказується: «Результати натурних випробувань кораблів свідчать про те, що безрозмірний час виходу корабля на циркуляцію, що встановилася, має той же порядок, що і отримане з розрахунку з урахуванням нелінійності». Безрозмірний час виходу на циркуляцію становить близько 5 одиниць. У наступному виданні «Довідника ...» [1, с. 347] повністю повторюється вищенаведена цитата і вказується на те, що безрозмірний час становить близько 5 одиниць, і також на іншій сторінці [1, с. 332] безрозмірний час виходу судна на циркуляцію, що встановилася, становить 6 одиниць.

Відмінність у безрозмірному часі руху судна на еволюційному етапі циркуляції – 5 чи 6 одиниць мож-

на пояснити кроком інтегрування, що у обох прикладах розрахунку становить дві одиниці. Приймаючи середину останнього кроку інтегрування отримаємо 5 одиниць, а приймаючи повний крок інтегрування – 6 одиниць.

Час руху судна на еволюційному етапі циркуляції не залежить від прийнятої методики розрахунку і є елементом об'єктивної реальності. Г.Є. Павленко пояснює вибір часу на еволюції таким чином: «Шляхом детальної обробки численних записів руху суден і моделей на еволюції нами було встановлено характер зміни швидкостей руху з початку перекладки керма і до встановлення постійної циркуляції... До повного встановлення циркуляції проходить час, необхідний для того, щоб судно, що йде зі своєю початковою швидкістю, пройшло шлях, рівний шести власним довжинам» [5, с. 160]. Отже, Г.Є. Павленко за умови миттєвого перекладання керма рекомендує приймати в розрахунках відносний час еволюційного етапу рівним 6 безрозмірним одиницям.

К.К. Федяєвським у [6, с. 313, рис. 181; с. 324, рис. 186] наведено результати розрахунку залежності швидкості ходу, кута дрейфу та кутової швидкості повороту від безрозмірного шляху, який проходить судно на траєкторії еволюції. З аналізу графіка на [6, с. 324, рис. 186] виходить, що кут дрейфу і кутова швидкість досягають значень, що встановилися, за проходження шляху рівному трьом довжинам судна, що відповідає трьом одиницям безрозмірного часу процесу еволюції. З графіка на згаданому малюнку [6, с. 313, рис. 181] слідує, що безрозмірна швидкість ходу на траєкторії еволюції досягає сталого значення після проходження п'яти довжин судна, що відповідає 5 одиницям безрозмірного часу процесу.

У більш пізньому виданні «Довідника ...» [2, с. 101] з посиланням на першоджерело – Г.Є. Павленко [5, с. 160] пропонується безрозмірний час виходу на циркуляцію, що встановилася, приймати рівним 6 одиницям.

Результат числового експерименту з лінеаризованою схемою розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції для безрозмірного часу процесу рівного 6 одиницям наведено на рис. 3.

Збіг траєкторій руху судна, наведених на рис. 3 дозволяє для даного конкретного випадку спростувати твердження про незастосовність лінеаризованої схеми розрахунку для побудови траєкторії на еволюції. Найбільша розбіжність у координатах траєкторій спостерігається на момент закінчення еволюційного етапу руху судна. Максимальний вибіг відрізняється на 0,22 одиниці, а максимальне бічне зміщення – на 0,12 одиниці, що не перевищує 6%. Збіг траєкторій руху судна слід визнати прийнятним для практичних розрахунків. Більш детально розбіжності у траєкторіях руху судна можна оцінити за результатами розрахунку, наведеними у табл. 1.

Відмінність в траєкторіях руху центру тяжіння судна, що показані в табл. 1, дозволяють зробити такі висновки.

До точки 5 (безрозмірний час 3,75) координати точок не відрізняються більш ніж на 4% або на 3,86 м. Зазначеною відмінністю можна знехтувати. Таким чином, при слабких маневрах судна, траєкторії руху, розраховані за нелінійною та лінеаризованими схемами, збігаються. Однак слід помітити одну якісну відмінність – при розрахунку за лінеаризованою схемою відсутнє зворотне зміщення центру тяжіння судна (точка 1).

Завершення еволюційного етапу циркуляції відповідає такій кількісній характеристиці керованості

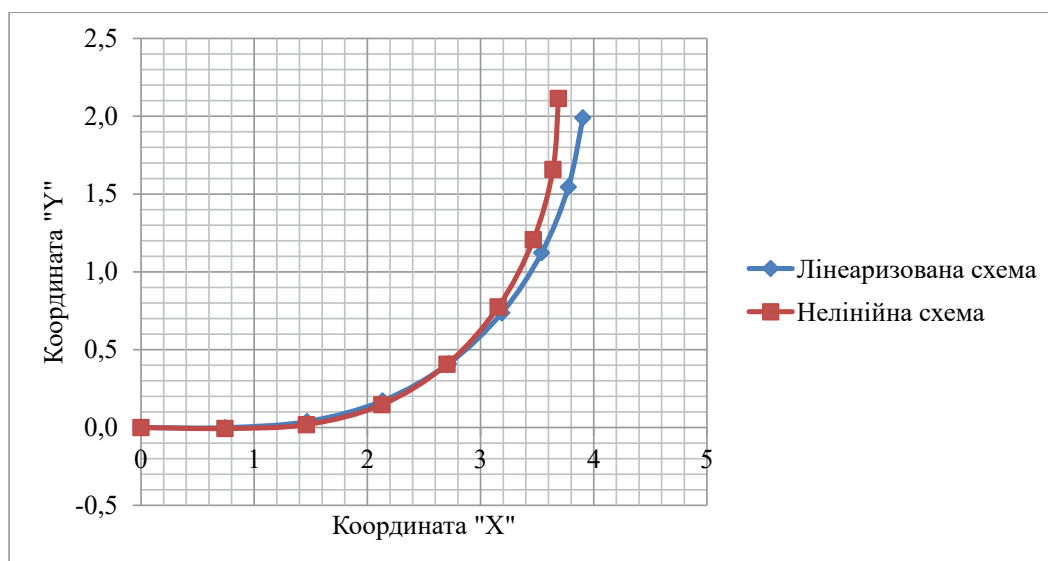


Рис. 3. Траєкторії руху судна в еволюційному періоді, розраховані за нелінійною та лінеаризованою схемами, при тривалості еволюції у 6 безрозмірних одиниць

Таблиця 1. Траєкторії руху судна на еволюції, розраховані за лінеаризованою та нелінійною схемами

№ точки на мал.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Безрозмірний час	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75	4,5	5,25	6
Траєкторія руху судна, що розрахована за лінеаризованою схемою									
Координата "X"	0	0,74	1,47	2,13	2,72	3,19	3,54	3,78	3,90
Координата "Y"	0	0,00	0,04	0,17	0,41	0,74	1,12	1,55	1,99
Траєкторія руху судна, що розрахована за нелінійною схемою									
Координата "X"	0	0,74	1,46	2,13	2,70	3,16	3,47	3,64	3,69
Координата "Y"	0	-0,01	0,02	0,15	0,41	0,78	1,21	1,66	2,11
Відмінність у координатах траєкторій руху, відносна									
Координата "X"	0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,07	0,14	0,22
Координата "Y"	0	0,01	0,02	0,02	0,00	-0,04	-0,08	-0,11	-0,12
Відмінність у координатах траєкторій руху, абсолютна, м									
Координата "X"	0	0,20	0,46	0,63	1,24	3,18	7,30	13,61	21,62
Координата "Y"	0	0,57	1,96	2,45	0,34	-3,86	-8,35	-11,27	-12,44

як висування судна. Максимальна помилка в координатах положення центру тяжіння судна в 22 м при маневруванні у вузькості може бути досить значущою. Однак характер наростання похибки в координатах центру тяжіння плавний і дозволяє прогнозувати величину помилки. Тим більше, що розрахунок за лінеаризованою схемою завжди дає помилку в координатах у бік відставання від розрахунку за нелінійною схемою [1, с. 323, 347; 3, с. 561, 592].

Отже, для інженерних розрахунків траєкторії руху судна на еволюції допустиме застосування лінеаризованої схеми, викладеної в [1, с. 325; 2, с. 96; 3, с. 564]. При цьому час еволюційного процесу для лінеаризованої схеми слід приймати рівним, як і для нелінійної схеми, 6 безрозмірним одиницям.

Однак при розрахунку траєкторії руху судна на еволюції за лінеаризованою схемою спостерігається в кінці періоду еволюції розбіжність у значеннях кута дрейфу і кутової швидкості судна зі значеннями цих величин з параметрами на циркуляції, що встановилася. Максимальна розбіжність у значеннях параметрів відповідає завершенню еволюційного етапу і не перевищує 8% для кутової швидкості та 10% для кута дрейфу. Для побудови траєкторії судна на еволюційному етапі циркуляції це не є істотним недоліком.

Зіставлення траєкторій руху судна, розрахованих за лінеаризованою та нелінійною схемами, для слабого маневру наведено на мал. 4.

Більш детально розбіжності у траєкторіях руху судна можна оцінити за результатами розрахунку, наведеними у табл. 2.

Найбільша відносна розбіжність у координатах траєкторій спостерігається в середині траєкторії (точки 3 та 4) та наприкінці (точка 8) еволюційного етапу руху судна. Відносні величини розбіжності координат траєкторій, розрахованих за нелінійною та модифікованою лінеаризованою схемами, не перевищують 3%, що є прийнятним для інженерних розрахунків.

Найбільше абсолютна розбіжність у координатах траєкторій спостерігається на момент закінчення еволюційного етапу руху судна. Максимальний вибіг відрізняється на 3,5 м, а максимальне бічне зміщення – на 0,38 м, що становить близько 3,5%. Збіг траєкторій руху судна слід визнати достатнім для будь-яких завдань розрахунку маневрування судна.

Обговорення отриманих результатів.

При розрахунку траєкторії руху судна на еволюції за модернізованою лінеаризованою схемою в кінці періоду еволюції спостерігається розбіжність кута дрейфу і кутової швидкості судна зі значеннями цих параметрів на циркуляції, що встановилася. Для побудови траєкторії судна на еволюційному етапі циркуляції це не є істотним недоліком.

Автори нелінійного та лінеаризованого методів розрахунку траєкторії судна на еволюції віддають перевагу нелінійній схемі розрахунку порівняно з лінеаризованою схемою, проте характер зазначеної переваги дещо змінюється у часі. У першому виданні «Довідника ...» [3, с. 562] автори вказують, що «Викладене не дозволяє беззастережно рекомендувати ... схему розрахунку елементів руху за лінеаризованими рівняннями для практичного визначення елементів руху корабля в еволюційному періоді циркуляції. Але завдяки своїй простоті вона може успішно застосовуватися для порівняльної оцінки впливу тих чи інших змін форми корпусу корабля і площі пера руля на маневрені якості корабля». У наступному виданні «Довідника» [1, с. 323] дається рекомендація більш категорично – «... не можна рекомендувати схему розрахунку елементів руху за лінеаризованим рівнянням для практичного визначення елементів руху судна в еволюційному періоді циркуляції. Проте у наступному виданні «Довідника ...» [2, с. 94] про лінеаризовану схему розрахунку вказується, що «Елементи руху судна ... збігаються з дійсністю лише при циркуляції, що встановилася ... Помилка, що походить від лінеаризації, ... зму-

шує рекомендувати використання лінійних рівнянь лише у виняткових випадках ... ». Тобто лінеаризований метод розрахунку все-таки рекомендується для слабких маневрів, а для сильних маневрів тільки у виняткових випадках.

Якщо у двох ранніх виданнях [3 с. 564, 571, 584, 586; 1 с. 325, 332, 339, 341] наводяться методики та приклади розрахунку для нелінійної та лінеаризованої схем, то в наступному виданні «Довідника ...» [2, с. 102] наводиться лише методика розрахунку траєкторії руху судна на еволюції за лінеаризованими рівняннями. Методика розрахунку за нелінійними рівняннями відсутня, як і відсутні приклади розрахунку обох методів. Вказівок на непридатність до лінеаризованої методики в останньому виданні немає. Зіставлення рекомендацій тих самих авторів у часі показує неоднозначність в оцінці лінеаризованої схеми розрахунку розробниками.

Слід врахувати, що розробники як лінеаризованого так і нелінійного методів розрахунку траєкторії руху судна на еволюції є представниками однієї наукової школи. Тому суперечка між прихильниками тієї чи іншої методики не носить відомчий характер, або характер конкуренції між науковими школами.

Аналіз результатів розрахунку, наведених у табл. 1, 2, а також на рис. 3, 4, показує, що лінеаризована схема розрахунку може бути використана для побудови траєкторії руху судна на еволюції. Час еволюційного процесу циркуляції судна слід приймати таким, що дорівнює 6 безрозмірним одиницям.

ВИСНОВКИ

1. Розробниками нелінійної та лінеаризованої методик розрахунку траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції є фахівці одного і того ж провідного науково-дослідного інституту в галузі

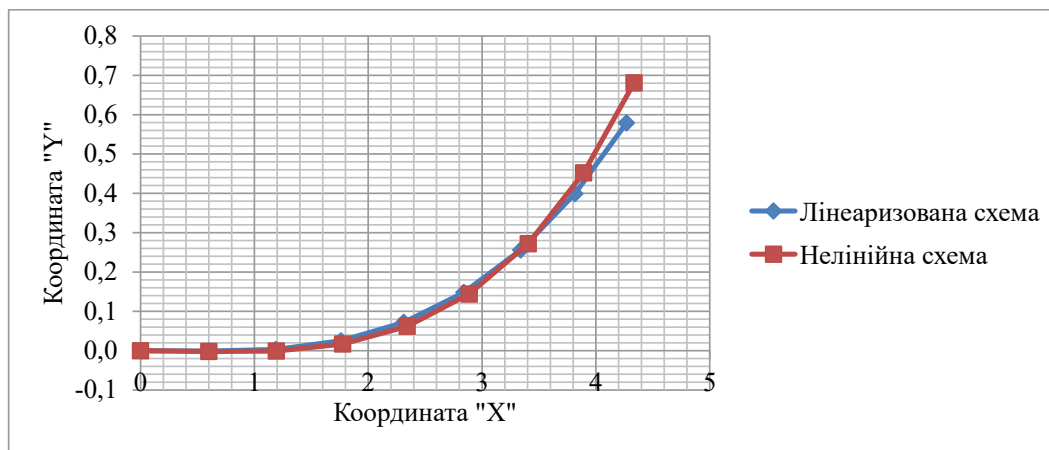


Рис. 4. Траєкторії руху судна в еволюційному періоді, розраховані за нелінійною та лінеаризованою схемами, кут перекладки керма 10 град.

Таблиця 2. Траєкторії руху судна на еволюції, розраховані за лінеаризованою та нелінійною схемами, кут перекладки керма 10 град.

№ точці на мал.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Безрозмірний час	0	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80
Траєкторія руху судна, що розрахована за лінеаризованою схемою									
Координата "X"	0	0,598	1,187	1,761	2,313	2,840	3,340	3,816	4,269
Координата "Y"	0	-0,001	0,003	0,025	0,072	0,148	0,256	0,399	0,579
Траєкторія руху судна, що розрахована за нелінійною схемою									
Координата "X"	0	0,600	1,193	1,775	2,343	2,888	3,406	3,892	4,336
Координата "Y"	0	-0,002	-0,001	0,017	0,062	0,144	0,272	0,452	0,681
Відмінність у координатах траєкторій руху, відносна									
Координата "X"	0	0,003	0,005	0,008	0,013	0,017	0,020	0,020	0,016
Координата "Y"	0	1,000	-1,333	-0,320	-0,139	-0,027	0,063	0,133	0,176
Відмінність у координатах траєкторій руху, абсолютна, м									
Координата "X"	0	0,20	0,60	1,40	3,00	4,80	6,60	7,60	6,70
Координата "Y"	0	-0,10	-0,40	-0,80	-1,00	-0,40	1,60	5,30	10,20
Відмінність у параметрах руху, відносна									
Швидкість ходу, "v"	0	0,006	0,008	0,019	0,039	0,036	0,049	0,039	0,011

кораблебудування. Тому питання переваги однієї чи іншої методики не є відомчою суперечкою чи суперечкою між окремими групами фахівців.

2. Твердження, що наведене у довідковій літературі, рядом авторів про значну розбіжність траєкторій судна, розрахованих за нелінійною та лінеаризованою схемами, для еволюційного періоду руху, не відповідає дійсності. Виконане, згаданими авторами, порівняння можна оцінити як зіставлення двох траєкторій для одного й того ж проміжку часу. При цьому в одному випадку береться до уваги еволюційний етап руху судна, а в другому двох етапів – еволюційного етапу та етапу циркуляції, що встановилася.

3. При слабких маневрах судна траєкторії руху, розраховані за нелінійною та лінеаризованими схемами, з практичною точністю збігаються. Однак слід звернути увагу на одну якісну відмінність – при розрахунку за лінеаризованою схемою відсутнє зворотне зміщення центру тяжіння судна.

4. При сильних маневрах судна спостерігається розбіжність у траєкторіях, розрахованих за нелі-

нійною та лінеаризованою схемами. Вказаною розбіжністю в ряді випадків можна знехтувати. Для слабких маневрів судна розбіжність у координатах траєкторій не перевищують 3%, що є прийнятним для практичних розрахунків. Час еволюційного процесу для лінеаризованої схеми слід приймати рівним, як і нелінійної схеми – 6 безрозмірним одиницям.

5. Характер наростання відмінностей у координатах траєкторії, що розрахована за лінеаризованою схемою, від траєкторії, розрахованої за нелінійною схемою – плавний і дозволяє прогнозувати величину помилки, так як розрахунок за лінеаризованою схемою завжди дає тенденцію у бік відставання від розрахунку занелінійною схемою.

6. При розрахунку траєкторії руху судна на еволюції за лінеаризованою схемою спостерігається розбіжність наприкінці періоду еволюції кута дрейфу та кутової швидкості судна зі значеннями цих параметрів на циркуляції, яка встановилася, що для побудови траєкторії не є істотним недоліком.

REFERENCES

- [1] Voytkunskiy YA.I. (1973). Spravochnik po teorii korablya. Sudovyye dvizhiteli i upravlyayemost. YA.I. Voytkunskiy, R.YA. Pershits & A.I. Titov. L.: Sudostroyeniye. 512 s. [in Russian].
- [2] Voytkunskiy YA.I. (Red.). (1985). Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. (T. 3) Upravlyayemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. L.: Sudostroyeniye. 544 s. [in Russian].
- [3] Voytkunskiy YA.I. (1960). Spravochnik po teorii korablya. Khodkost' i upravlyayemost'. YA.I. Voytkunskiy, R.YA. Pershits & A.I. Titov. L.: Gosudarstvennoye soyuznoye izdatel'stvo sudostroitel'noy promyshlennosti. 688 s. [in Russian].
- [4] Kazarezov A.YA., Donchenko M.V. (2019). Raschet trayektorii dvizheniya sudna na neustanovivsheysya tsirkulyatsii. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Innovatsii v sudostroyenii i okeanotekhnike». V 2 tomakh. T 2. – Nikolayev: NUK, 2019. – 448 s. [in Ukrainian].
- [5] Pavlenko G.Ye. (1949). Problemy statiki korablya. G.Ye. Pavlenko. M., L.: Morskoy transport. [in Russian].
- [6] Fedyayevskiy K.K. (1963). Upravlyayemost' korablya. K.K. Fedyayevskiy, G.V. Sobolev. L.: Gosudarstvennoye soyuznoye izdatel'stvo sudostroitel'noy promyshlennosti. [in Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Войткунский Я.И. (1973). Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, А.И. Титов. Л.: Судостроение. 512 с.
- [2] Войткунский Я.И. (Ред.). (1985). Справочник по теории корабля: В трех томах. (Т. 3) Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение. 544 с.
- [3] Войткунский Я.И. (1960). Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, А.И. Титов. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. 688 с.
- [4] Казарезов А.Я., Донченко М.В. (2019). Расчет траектории движения судна на неустановившейся циркуляции. Материалы X Международной научно-технической конференции: «Инновации в суднобудованні та океанотехніці». У 2 томах. Т 2. – Миколаїв: НУК, 2019. – 448 с.
- [5] Павленко Г.Е. (1949). Проблемы статики корабля. Г.Е. Павленко. М., Л.: Морской транспорт.
- [6] Федяевский К.К. (1963). Управляемость корабля. К.К. Федяевский, Г.В. Соболев. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности.

© А. Я. Казарезов, Ю. М. Пашенко

Дата надходження статті до редакції: 16.03.2023

Дата затвердження статті до друку: 25.03.2023