

УДК 629.3.067

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-47-57

**ВИБІР МАНЕВРА ПОВЕРНЕННЯ СУДНА
НА ПРОГРАМНУ ТРАЕКТОРІЮ РУХУ БЕЗ КООРДИНАЦІЇ З ЦІЛЛЮ**

Т.В. Калініченко

аспірант, старший викладач
кафедри навігації та управління морськими суднами

Державний університет інфраструктури та технологій, Україна

Анотація. У статті розглядається одна з багатьох проблем попередження зіткнень суден як однією з найактуальніших у забезпеченні безпеки судноводіння.

В процесі комп'ютерного імітаційного моделювання процесу розходження суден, що знаходяться на невеликих відстанях небезпека зіткнення може виникнути на етапі повернення суден на їх програмні траєкторії руху.

У статті отримано умову безпечного виходу судна на програмну траєкторію руху для випадку, коли не виконується координація з ціллю. Наведено вираз відносної кутової швидкості, що виникає під час повороту суден, а також представлено графічну залежність відносної кутової швидкості від часу.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, маневр повернення судна на програмну траєкторію.

UDC 629.3.067

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-47-57

**SELECTION OF THE MANEUVER TO RETURN THE SHIP
TO THE PROGRAM TRAJECTORY OF MOVEMENT WITHOUT
COORDINATION WITH THE PURPOSE**

T. Kalinichenko

graduate student, senior teacher
Department of Navigation and Management of Marine Vessels

State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

Abstract. *The article deals with one of the problems of preventing ships from closing, as one of the most important problems in the safety of ship navigation.*

In the process of computer simulation of the process of disengagement of ships, which are located on small distances of insecurity, it can be caused at the stage of turning ships on their program trajectories.

The article obtained the condition for the safe exit of the ship to the program trajectory for the case when there is no coordination with the target. An expression is given for the relative angular velocity that occurs when ships turn, and a graphical dependence of the relative angular velocity on time is also presented.

Keywords: *navigation safety, ship collision prevention, ship return maneuver to the program trajectory.*

Вступ. Проблема попередження зіткнень суден є однією з найактуальніших у забезпеченні безпеки судноводіння.

В процесі комп'ютерного імітаційного моделювання процесу розходження суден, що знаходяться на невеликих відстанях, виявилось, що небезпека зіткнення може виникнути на етапі повернення суден на їх програмні траєкторії руху.

Для забезпечення безпечного маневру повернення суден на програмні траєкторії після їхнього ухилення пропонується метод вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю.

У численних роботах вітчизняних та зарубіжних учених розглядаються питання запобігання зіткненням суден. Проблема попередження зіткнень суден докладно досліджена в роботі [1], в якій запропоновано метод гнучких стратегій їхнього розходження, що передбачають формування стратегії розходження з кількома цілями.

У роботі [2] запропоновано формалізацію взаємодії суден в разі виникненні загрози зіткнення та розглянуто логічний опис МПЗЗС-72, а монографія [3] присвячена особливостям розходження суден у морі методом попередження зіткнення суден шляхом зміщення на лінію паралельну шляху їхнього руху.

Результатам дослідження ефективності парних маневрів розходження суден, що небезпечно зближуються, присвячена робота [4]. Спосіб формування області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден запропоновано у роботі [5], у роботі також показано процедуру визначення оптимальних швидкостей розходження за допомогою запропонованої області.

Автономна судова система ухилення від зіткнення СА (Collision avoidance) та її теоретичне обґрунтування розглядається у роботі [6]. З урахуванням чинників, що впливають на процес ухилення від зіткнення, розглядаються вимоги до автономної навігації. У роботі вказується, що дослідження автоматизації керування судном можуть бути представлені в класичному або комп'ютерному підходах.

У роботі [7] запропоновано спосіб формування області допустимих комбінованих маневрів розходження судна з двома небезпечними цілями зміною курсу та його пасивним гальмуванням. Кожній точці області відповідають три параметри маневру розходження: час та курс ухилення для розходження з першою ціллю, а також швидкість, до якої знижується початкова швидкість гальмування судна.

Проблема вибору несуперечливої структури системи бінарної координації взаємодії пари суден у ситуації небезпечного зближення докладно розглянуто у роботі [8].

Як вказується в публікації [9], СКРС, зазвичай, не має технічних можливостей контролювати рух суден на ділянках їхнього скупчення і для ухилення від зіткнення у статті запропоновано новий фуззі-метод. Використовуючи аналітичну модель морської системи GIS, можна отримати точне прогнозування часу зіткнення і позиції. Запропонований метод дає оператору СКРС можливість ухвалення рішень щодо попередження зіткнення суден.

Метод оцінки ризику зіткнення з використанням режиму істинного руху розглядається та обговорюється у роботі [10]. У статті вводяться лінія прогнозові-ного зіткнення (ЛОПС) та зона перешкод за ціллю (OZT) для оцінювання ризику зіткнення, ці значення пов'язані з істинним рухом, і це дає можливість виявити ситуації небезпечного зближення та забезпечити безпечне плавання у стиснених водах.

Постановка задачі. Мета статті полягає у розробці процедури вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю.

Виклад основного матеріалу. Виникають ситуації, коли початкова інтенсивність ситуаційного збурювання $\tilde{\omega}_0$ судна і цілі дорівнює нулю ($\tilde{\omega}_0 = 0$), тобто вони перебувають у першій області взаємних обов'язків і можуть розійтися на мінімальній дистанції $\min L$, яка переважає гранично-допустиму L_d ($\min L \geq L_d$).

Якщо ситуація небезпечного зближення характеризується початковою інтенсивністю ситуаційного збурювання $\tilde{\omega}_0 > 0$, то судно не може розійтися з ціллю на гранично допустимій дистанції ($\min L < L_d$) і початок маневру виходу судна на програмну траєкторію руху виконується в момент часу, коли поточна дистанція L_t зростає до значення L_d ($L_t = L_d$).

Маневр повернення судна на програмну траєкторію руху, як заключний етап процесу розходження судна з ціллю, характеризується початковою ситуацією, що включає відносне положення судна та цілі, а також їх справжні та відносні параметри руху.

Особливістю початкової ситуації є те, що початкова дистанція L_o між судном і ціллю, як зазначалося, дорівнює гранично допустимій дистанції L_d , що характеризує завершення етапу ухилення (рис. 1) процесу розходження та початку етапу повернення на програмну траєкторію. Причому до початкового моменту дистанція між судном та ціллю зростала.

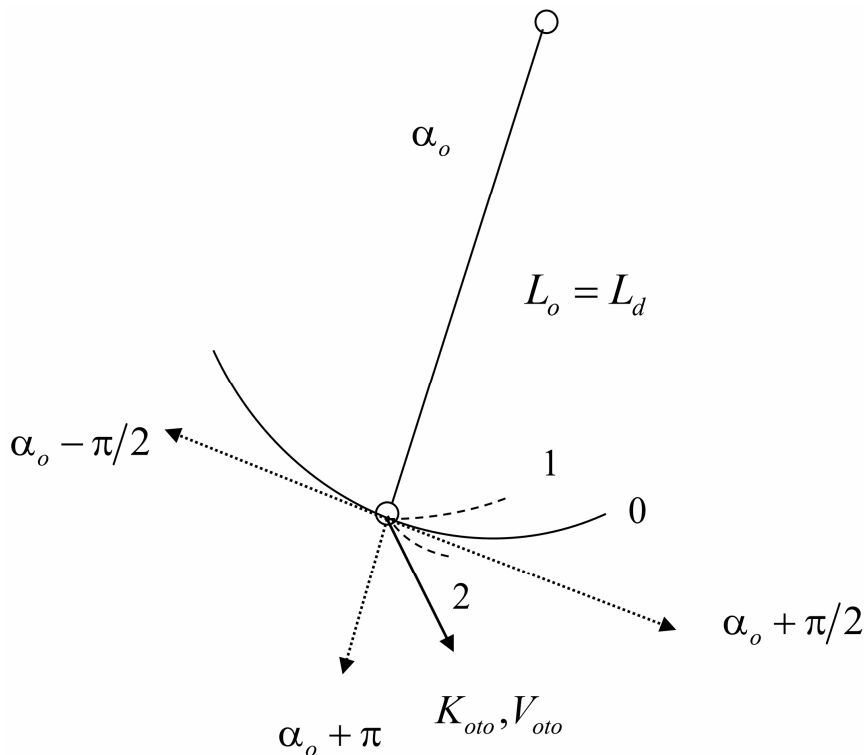


Рис. 1. Початкова ситуація маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Першою обов'язковою умовою безпечного повернення судна на програмну траєкторію руху є збільшення дистанції L_t між суднами, тобто $\frac{dL_t}{dt} > 0$ ($L_t > L_d$), враховуючи, що судно починає поворот для повернення у бік програмної траєкторії.

Як випливає з рисунка, якщо судно у відносному русі переміщатиметься траєкторією 0, то дистанція між судном і ціллю на етапі повернення на програмну траєкторію буде незмінною і ситуація небезпечного зближення не виникне. Якщо ж судно переміщатиметься траєкторією 1, воно зближується з ціллю і виникає загроза зіткнення. У разі, коли відносне переміщення судна відбувається за траєкторією 2, воно буде віддалятися від цілі.

Сформулюємо умову безпечного виходу судна на програмну траєкторію руху, використовуючи рис. 1. Як випливає з рисунка, поточна дистанція L_t на етапі повернення судна на програмну траєкторію руху збільшуватиметься, якщо початковий відносний курс K_{oto} перебуває у секторі від значення $\alpha_o + \pi/2$ до

значення $\alpha_o + \pi$, і він зростає у часі, тобто $K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi]$ і $\omega_{ot} = \frac{dK_{ot}}{dt} > 0$.

Також дистанція L_t буде збільшуватись, якщо початковий відносний курс K_{oto} належить підмножині курсів від значення $\alpha_o + \pi$ до значення $\alpha_o - \pi/2$ та відносний курс K_{oto} зменшується, що аналітично виражається так:

$$K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0.$$

Початкові ситуації, що характеризуються співвідношеннями $K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o]$ і $\omega_{ot} > 0$, а також $K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2]$ і $\omega_{ot} < 0$ відрізняються тим, що поточна дистанція скорочується, тобто $\frac{dL_t}{dt} < 0$, як показано на рис. 2.

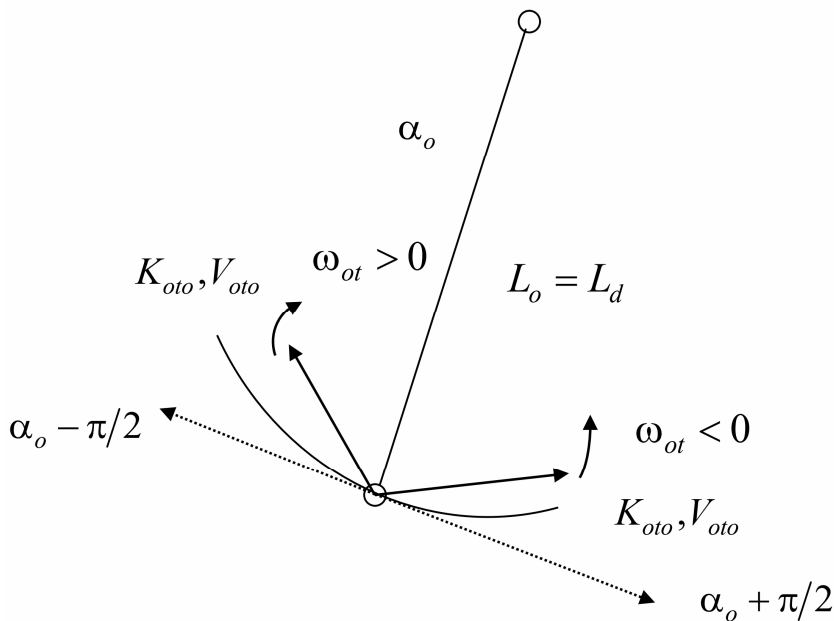


Рис. 2. Початкові неприпустимі ситуації для безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Однак є ситуації, коли зміна поточної дистанції не є очевидною. До таких ситуацій належать такі, які визначаються одним із наступних чотирьох співвідношень:

$$\begin{aligned} K_{oto} &\in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} < 0; \\ K_{oto} &\in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0; \\ K_{oto} &\in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} < 0; \\ K_{oto} &\in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0. \end{aligned}$$

Дані ситуації показано на рис. 3.

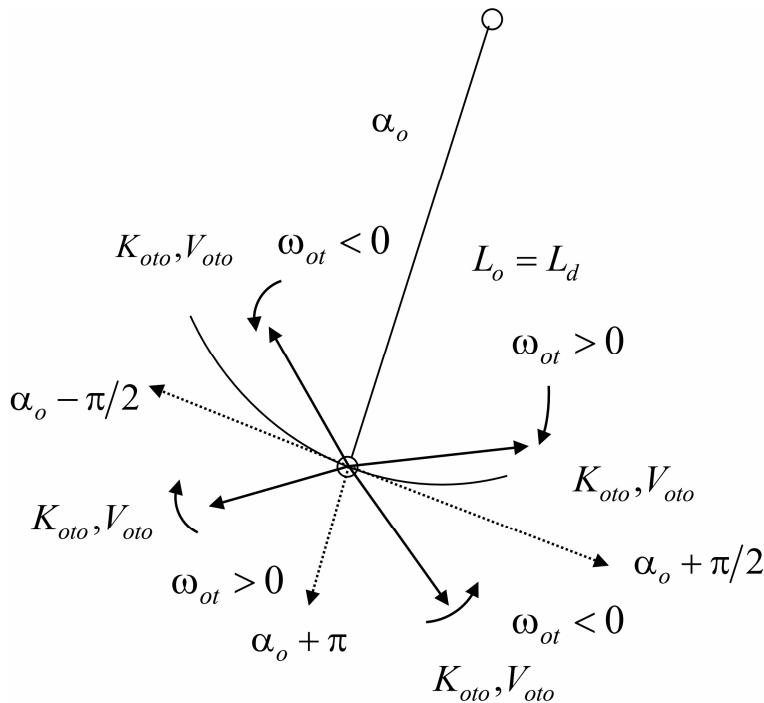


Рис. 3. Початкові невизначені ситуації для безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Таким чином, розрізнятимемо три підмножини ситуацій залежно від співвідношення величин початкового відносного курсу K_{oto} та відносної кутової швидкості ω_{ot} .

До першої підмножини Mn_1 належать безпечні ситуації G , за яких забезпечене гарантоване зростання дистанції між судом та ціллю, тобто $\frac{dL_t}{dt} > 0$. Другу підмножину Mn_2 складають ситуації, за яких дистанція між судном та ціллю скорочується $\left(\frac{dL_t}{dt} < 0\right)$. І, нарешті, до третього підмножини ситуацій Mn_3 належать ті ситуації, для яких можливе збільшення дистанції L_t , так і його зменшення.

У загальному випадку належність ситуації G до однієї із підмножин Mn_i визначається наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
 G \in Mn_1, \text{ якщо } & \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \right\}, \\
 & \text{або } \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \right\}; \\
 G \in Mn_2, \text{ якщо } & \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \right\}, \\
 & \text{або } \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \right\}; \\
 G \in Mn_3, \text{ якщо } & \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \right\}, \\
 & \text{або } \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \right\}, \\
 & \text{або } \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \right\}, \\
 & \text{або } \left\{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \right\}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Зазначені умови визначають можливість виконання безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію з урахуванням того, що дистанція між суднами досягла на етапі ухилення величини, що дорівнює гранично допустимому значенню L_d .

Другою важливою обставиною є необхідна сторона повороту судна для виходу на програмну траєкторію, яка визначається на відміну від попереднього випадку в істинному русі, і залежить від сторони його ухилення. Ця обставина визначає знак кутової швидкості повороту судна під час виконання маневру повернення на програмну траєкторію.

Очевидно, якщо в результаті ухилення під час розходження судно виявилось праворуч від програмної траєкторії руху, то для виходу на неї судно має виконувати поворот вліво. Позначимо через Δ_y характеристику ухилення судна,

причому $\Delta_y > 0$ у випадку ухилення судна вправо, та $\Delta_y < 0$ у випадку ухилення вліво. Кутова швидкість повороту судна ω_V додатна ($\omega_V > 0$), якщо воно повертає вправо, та негативна якщо воно повертає вліво, та від'ємна ($\omega_V < 0$) під час його повороту вліво.

Таким чином, справедлива умова визначення знаку кутової швидкості судна ω_{Vb} під час вибору маневру виходу на задану траєкторію

$$\text{sign}(\omega_{Vb}) = -\text{sign}(\Delta_y). \quad (2)$$

Спільне врахування умов (1) та (2) дозволяє вибрати безпечний маневр виходу судна на програмну траєкторію руху. Однак для цього необхідно знайти вирази для початкового курсу K_{oto} та відносної кутової швидкості ω_{ot} .

Було отримано вираз відносної кутової швидкості ω_{ot} :

$$\omega_{ot} = \frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{V_v \cos(K_{vo} + \omega_v t) \omega_v - V_c \cos(K_{co} + \omega_c t) \omega_c}{V_v \cos K_v + V_c \cos K_c} - \frac{[V_v \sin(K_{vo} + \omega_v t) - V_c \sin(K_{co} + \omega_c t)] V_v V_c \sin(\Delta K_o + \Delta \omega t) \Delta \omega}{(V_v \cos K_v + V_c \cos K_c) V_{ot}^2}, \quad (3)$$

де $\Delta \omega = \omega_v - \omega_c$.

Перевірка коректності отриманого виразу проводилася за допомогою розрахунку значень відносної кутової швидкості ω_{ot} , використовуючи формулу (3), а також як різницю відносних курсів в одиницю часу за заданих кутових швидкостей ω_v і ω_c . Розрахунки проводилися на комп'ютері та значення кутової швидкості ω_{ot} отримані вказаними способами збігалися, що підтвердило коректність виразу (3).

На рис. 4 показано залежність кутової швидкості ω_{ot} від часу, обраний інтервал часу, що дорівнює 1000 с, початкові курси судна та цілі склали $K_{vo} = 45$, $K_{co} = 40$, а їхні швидкості $V_v = 15$, $V_c = 20$, кутові швидкості дорівнюють відповідно $\omega_v = 0,5$ і $\omega_c = 1,5$.

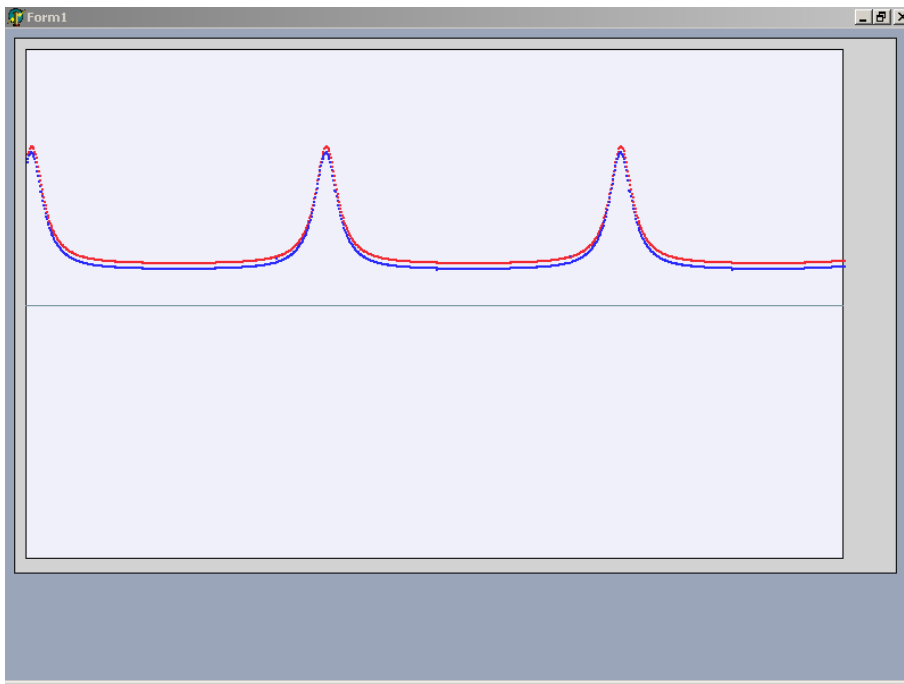


Рис. 4. Залежність відносної кутової швидкості від часу

Рис. 4 містить дві криві, одна з яких розрахована за формулою (3), а друга – різницею відносних курсів. Обидві криві фактично зливаються, спеціально для того, щоб вони були видимими, одна з кривих піднята на графіку на кілька пікселів.

Висновки

1. Сформульовано умову безпечного виходу судна на програмну траєкторію руху.
2. Наведено вираз для відносної кутової швидкості, що виникає під час повороту судна.
3. Наведено графічну залежність відносної кутової швидкості від часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 312 с.
3. Вагуценко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагуценко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.

4. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков, С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, – Вып.15. – Одесса: «ИздатИнформ», 2008. – С. 166-171.
5. Кулаков М.А. Выбор оптимальных скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения / М.А. Кулаков // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 51-57.
6. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. – Vol. 61. – № 1. – P. 129-142.
7. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / И.А. Бурмака, Э.Н. Пятаков. // East European Science Journal. № 5 (33). 2018. Part 1. – С. 19-24.
8. Volkov A. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E. Pyatarov & A. Yakushev // Activities in Navigation. – Adam Weintrit. – 2015. – P. 195- 200.
9. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der // J. Navig. 2007. – Vol. 60. – № 1. – P. 17-31.
10. Imazu H. Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion / H. Imazu // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2017. – Vol. 11. – № 1. – P. 65-70.

REFERENCES

1. Tsimbal N.N. Flexible strategies of divergence of vessels / N.N. Tsimbal, I.A. Burmaka and E.E. Tyupikov. – Odessa: KP OGT. – 2007. – 424 p.
2. Pyatakov E.N. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / E.N. Pyatakov, R.Y. Buzhbeckij, I.A. Burmaka, A.Y. Bulgakov – Kherson: Grin D.S. – 2015. – 312 p.
3. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / L.L. Vagushchenko. – Odessa: Feniks. – 2013. – 180 p.
4. Pyatakov E.N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / E.N. Pyatakov, S.I. Zaichko // Sudovozhdenie. – 2008. – № 15. – p. 166-171.
5. Kulakov M. Choice of optimum speeds of vessels at the external their process control of divergence / M. Kulakov // Automation of ship hardwires. – 2017. – № 23. – P. 51-57.
6. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus // J. Navig. 2008. – Vol. 61. – № 1. – P. 129-142.

7. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / И.А. Бурмака, Э.Н. Пятаков. // *East European Science Journal*. № 5 (33). 2018. – Part 1. – С. 19-24.
8. Volkov A. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E. Pyatarov & A. Yakushev // *Activites in Navigation*. – Adam Weinrit. – 2015. – P. 195-200.
9. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der // *J. Navig.* 2007. – Vol 60. – № 1. – p. 17-31.
10. Imazu H. Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion / H. Imazu // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2017. – Vol. 11. – № 1. – P. 65-70.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2023

Посилання на статтю: Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна а програмну траєкторію руху без координації з ціллю // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 3 (70). С. 47-57. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-3- 47-57.

Article received 10.04.2023

Reference a journalartic: Kalinichenko T.V. Selection of the maneuver to return the ship to the program trajectory of movement without coordination with the purpose // Herald of the Odessa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 3(70). P. 47-57. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-3-47-57.