

УДК 629.3.067

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-155-169

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОМ
ПІД ЧАС ВИХОДУ НА ПРОГРАМНУ ТРАЄКТОРІЮ
ЗА СТАНОМ ПОТОЧНОЇ СИТУАЦІЇ**

Т.В. Калініченко

аспірант, старший викладач кафедри навігації і управління суднами

ORCID ID: 0000-0003-3531-8281

e-mail: tkatana1002@gmail.com

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

***Анотація.** У статті запропоновано спосіб повернення суден на програмні траєкторії руху з урахуванням їхньої координатії. Розглянуто принцип координатії суден в процесі вибору ними безпечних маневрів повернення на програмні траєкторії руху. Здійснено розробку методу оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, який враховує раніше отримані теоретичні результати та забезпечує як відсутність небезпечного зближення з ціллю, так і точний вихід на програмну траєкторію руху.*

***Ключові слова:** навігація, безпека судноплавства, запобігання зіткнень, маневрування суден, оперативне управління судном, комп'ютерне моделювання, траєкторія руху, відносний курс, кутова швидкість, маневр повернення судна на програмну траєкторію.*

UDC 629.3.067

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-155-169

**DEVELOPMENT OF THE VESSEL OPERATIONAL CONTROL METHOD
DURING THE EXIT ON THE PROGRAM TRAJECTORY
UNDER THE CURRENT SITUATION**

Tatiana Kalinichenko

graduate student, senior lecturer

Department of Navigation and Shiphandling

ORCID ID: 0000-0003-3531-8281

e-mail: tkatana1002@gmail.com

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine

Abstract. *The article proposes a way to return ships to the program trajectories of movement, taking into account their coordination. The principle of coordination of ships in the process of their selection of safe maneuvers to return to the program trajectories of movement is considered. The method of operational control of the vessel during the departure to the program trajectory according to the current situation was developed, which takes into account the previously obtained theoretical results and ensures both the absence of a dangerous approach to the target and the accurate departure to the program trajectory of movement.*

Keywords: *navigation, navigation safety, collision prevention, ship maneuvering, operational ship control, computer modeling, motion trajectory, relative course, angular velocity, maneuver to return the ship to the programmed trajectory.*

Вступ. Запобігання зіткненням суден є ключовим аспектом у забезпеченні безпеки мореплавства. В процесі комп'ютерного моделювання сценаріїв мінімальних дистанцій між суднами виявлено, що ризик зіткнення з'являється під час спроб повернення суден на заплановані траєкторії. Розроблений метод дозволяє безпечно виконувати маневр повернення на програмну траєкторію без потреби в координації з іншими суднами.

Різні вчені, як у вітчизняних, так і в міжнародних дослідженнях, зосереджуються на методах запобігання зіткненням суден. Вивчення цієї проблеми, згідно з роботою [1], включає розробку гнучких стратегій ухилення з багатьма цілями. Дослідження [2] описує формалізацію взаємодії суден у кризових ситуаціях, а монографія [3] описує методики уникнення зіткнень шляхом маневрування.

Робота [4] присвячена аналізу результатів ефективності парних маневрів розходження для суден, які опиняються у небезпечній близькості. У дослідженні [5] розроблено методику створення зони недопустимих швидкостей для групи суден та описано метод визначення оптимальних швидкостей розходження за допомогою цієї зони.

Автономна система уникнення зіткнень для суден (СА) та її теоретичне підґрунтя аналізується у дослідженні [6]. Враховуючи фактори, які впливають на процес уникнення зіткнень, розглядаються стандарти для автономної навігації. У дослідженні зазначається, що автоматизація управління судном може використовувати традиційний чи комп'ютерний методи.

У дослідженні [7] представлено методику створення зони дозволених комбінованих маневрів для ухилення судна, яке стикається з двома потенційно небезпечними об'єктами, шляхом зміни курсу та пасивного гальмування. Кожна точка в цій зоні характеризується трьома параметрами маневру ухилення: часом і курсом для ухилення від першої цілі, а також швидкістю, до якої має бути знижена початкова швидкість судна.

Детальний аналіз проблеми створення узгодженої системи бінарної координації для пари суден в умовах потенційної небезпеки зіткнення проведено у роботі [8]. Згідно з публікацією [9], системи контролю руху суден часто не володіють необхідними технічними засобами для моніторингу їхнього зосередження, тому пропонується новий фuzzi-метод. Цей метод дозволяє, використо-

вуючи аналітичну модель морської системи GIS, точно передбачити час та місце потенційного зіткнення, забезпечуючи оператору можливість ефективно уникнути аварії.

У роботі [10] розглядається метод оцінювання ризику зіткнень, що базується на режимі істинного руху. Вводяться поняття лінії прогнозування зіткнення (ЛОПС) та зони перешкод (OZT), що допомагають оцінити ризики і виявити потенційно небезпечні ситуації, забезпечуючи безпеку плавання у складних водних умовах.

Ця літературна основа є фундаментом для подальшої розробки та впровадження новітніх методів забезпечення безпеки мореплавства.

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

Виклад основного матеріалу. Розглянемо принцип координації суден під час вибору ними безпечних маневрів повернення програмні траєкторії руху. У загальному випадку кожне з суден під час маневру може вибрати один із трьох варіантів: повороту вправо, повороту вліво або продовжити слідувати незмінним курсом. Для судна такі маневри позначимо відповідно , $G_-^{(v)}$ і $G_0^{(v)}$, а для цілі $G_+^{(c)}$, $G_-^{(c)}$ і $G_0^{(c)}$. Координація передбачає вибір парного маневру для судна та цілі залежно від початкової ситуації, що забезпечує їхнє безпечне повернення на програмні траєкторії. За таких умов суттєвою є зміна відносного курсу K_{ot} від зміни курсів судна і цілі K_v і K_c .

Знайдемо таку залежність, виходячи з того, що в роботі [26] наведено вираз відносного курсу K_{ot} у функції курсів K_v , K_c і швидкостей V_v , V_c судна та цілі, яке має наступний вигляд:

$$K_{ot} = \arcsin \left[\frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)}{V_{ot}} \right].$$

Для отримання необхідної залежності необхідно цей вираз спочатку продиференціювати за курсом судна K_v , а потім отриманий результат – за курсом цілі K_c .

Похідна вихідного виразу за курсом K_v

$$\frac{dK_{ot}}{dK_v} = \left\{ 1 - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2} \right\}^{-1/2} \cdot \frac{d}{dK_v} \left[\frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_v)}{V_{ot}} \right]. \quad (1)$$

Після перетворень співвідношення (1) виражається так:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} = \frac{V_v(V_v - V_c \cos \Delta K)}{V_v^2 + V_c^2 - 2V_v V_c \cos \Delta K},$$

де $\Delta K = K_v - K_c$.

Розділимо чисельник і знаменник виразу на V_v^2

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} = \frac{1 - \rho \cos \Delta K}{1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K} \quad (2)$$

де $\rho = \frac{V_c}{V_v}$ причому $V_v > V_c$ і $\rho < 1$.

Для пошуку залежності, зміни величини відносного курсу K_{ot} від одночасної зміни курсів обох суден K_v і K_c необхідно вираз (2) продиференціювати за змінною K_c

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \frac{\frac{\partial}{\partial K_c}(1 - \rho \cos \Delta K)(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)^2} - \frac{(1 - \rho \cos \Delta K) \frac{\partial}{\partial K_c}(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)^2}. \quad (3)$$

Знаходимо необхідні похідні

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial K_c}(1 - \rho \cos \Delta K) &= -\rho \sin \Delta K \\ \frac{\partial}{\partial K_c}(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K) &= -2\rho \sin \Delta K. \end{aligned}$$

Підставляємо отримані вирази у формулу (3) та отримуємо

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \frac{(-\rho \sin \Delta K)(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K) - (1 - \rho \cos \Delta K)(-2\rho \sin \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)^2}.$$

Остаточно отримуємо шуканий вираз

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \rho \sin \Delta K \left[\frac{2(1 - \rho \cos \Delta K) - (1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2\rho \cos \Delta K)^2} \right]. \quad (4)$$

Парні маневри судна і цілі становлять набір із восьми можливих варіантів (виключаючи варіант сталості курсів судна і цілі):

$$\begin{aligned} M_{o,+} &= (G_o^{(v)}, G_+^{(c)}), M_{o,-} = (G_o^{(v)}, G_-^{(c)}), \\ M_{+,o} &= (G_+^{(v)}, G_o^{(c)}), M_{-,o} = (G_-^{(v)}, G_o^{(c)}), \\ M_{+,+} &= (G_+^{(v)}, G_+^{(c)}), M_{+,-} = (G_+^{(v)}, G_-^{(c)}), \\ M_{-,+} &= (G_-^{(v)}, G_+^{(c)}), M_{-,-} = (G_-^{(v)}, G_-^{(c)}). \end{aligned}$$

Перелічені парні маневри судна та цілі вибираються в початковий момент часу ($t = 0$), тому вираз для відносної кутової швидкості ω_{otb} на початку маневру виходу визначається виразом

$$\begin{aligned} \omega_{ot}(t=0) &= \frac{V_v \cos(K_{vy}) \omega_{vb} - V_c \cos(K_{cy}) \omega_c}{V_v \cos(K_{vy}) + V_c \cos(K_{cy})} - \\ &- \frac{[V_v \sin(K_{vy}) - V_c \sin(K_{cy})] V_v V_c \sin(\Delta K_y) \Delta \omega_b}{[V_v \cos(K_{vy}) + V_c \cos(K_{cy})] V_{ot}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Аналіз отриманих виразів (4) та (5) дозволяє оцінити доцільність застосування тих чи інших парних маневрів у різних початкових ситуаціях. Для визначеності вважатимемо, що швидкість судна перевищує швидкість цілі, тобто $V_v > V_c$.

В результаті аналізу отримано такі результати. Якщо реалізується парний маневр $M_{o,+} = (G_o^{(v)}, G_+^{(c)})$, під час якого $\frac{\partial K_v}{\partial t} = 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$, то у випадку

$K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$ має місце співвідношення $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$, якщо ж

$K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$, то $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$. Причому значення $K_{c \max}$ і $K_{c \min}$ розраховую-

ться за формулами $K_{c \min} = K_1 + \arccos(p)$ і $K_{c \max} = K_1 - \arccos(p)$.

Під час парного маневру $M_{o,-} = (G_o^{(v)}, G_-^{(c)})$, коли $\frac{\partial K_v}{\partial t} = 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$, в разі $K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$ справедлива нерівність $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$, якщо ж

$K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$, то $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$.

У разі парного маневру $M_{+,o} = (G_+^{(v)}, G_o^{(c)})$ $\frac{\partial K_v}{\partial t} > 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} = 0$ справедливо $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K} > 0$, а парний маневр $M_{-,o} = (G_-^{(v)}, G_o^{(c)})$, під час якого $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} = 0$ характеризується нерівністю $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} < 0$.

Для парних маневрів, коли курс змінюють обидва судна, справедливі наступні співвідношення.

Парний маневр $M_{+,+} = (G_+^{(v)}, G_+^{(c)})$, коли $\frac{\partial K_v}{\partial t} > 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$, незалежно від різниці курсів ΔK характеризується нерівністю $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$.

Для парного маневру $M_{+,-} = (G_+^{(v)}, G_-^{(c)})$ $\frac{\partial K_{ot}}{\partial t} > 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$ за різниці курсів 180 і 270 градусів величина $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} \approx 0$, а коли різниця курсів дорівнює 0 і 90 градусів $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$, причому максимальне значення припадає за $\Delta K = 0$.

Парний маневр $M_{-,+} = (G_-^{(v)}, G_+^{(c)})$, для якого $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$, зміна відносного курсу також залежить від різниці курсів ΔK . Так, за $\Delta K = 180$ і $\Delta K = 90$ справедливо $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} \approx 0$, а у випадку $\Delta K = 0$ і $\Delta K = 270$ має місце $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$, причому найбільша зміна за $\Delta K = 0$.

Заключний парний маневр $M_{-,-} = (G_-^{(v)}, G_-^{(c)})$, або $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$ і $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$, незалежно від значення ΔK характеризується нерівністю $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$.

Під час вибору парного маневру для конкретної ситуації необхідно враховувати сторону повороту, необхідну для виходу на програмну траєкторію руху. Параметр, що характеризує необхідну сторону повороту, позначимо через q , причому повороту вправо відповідає $q = 1$, а повороту вліво $q = -1$. Необхідний бік повороту для судна визначається за допомогою виразу $q_v = -\text{sign}(\Delta_{yv})$, а для цілі $q_c = -\text{sign}(\Delta_{yc})$.

Перелік початкових ситуацій G_{ξ} та відповідні їм парні маневри $M_{i,j}$ безпечного виходу судна та цілі на програмні траєкторії наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Відповідність парних маневрів $M_{i,j}$ початковим ситуаціям G_{ξ}

G_i	q_v	q_c	ΔK	γ	$M_{i,j}$	Tr_v	Tr_c	Прим.
G_1	1	-1	$\Delta K \in [0, 90]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,-}$	1 тип	1 тип	
G_2	1	-1	–	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,+}$	1 тип	2 тип	
G_3	-1	1	$\Delta K \in [270, 360]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,+}$	1 тип	1 тип	
G_4	-1	1	–	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,-}$	2 тип	1 тип	
G_5	1	1	–	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{+,+}$	1 тип	1 тип	
G_6	1	1	–	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{+,-}$	1 тип	2 тип	
G_7	-1	-1	–	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{-,+}$	1 тип	1 тип	
G_8	-1	-1	–	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{-,+}$	1 тип	2 тип	
G_9	0	1	$K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
G_{10}	0	1	–	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v \leq V_c$
G_{11}	0	1	$K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
G_{12}	0	-1	$K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,-}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
G_{13}	0	-1	–	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,-}$	-	1 тип	$V_v \leq V_c$
G_{14}	1	0	$K_v \in [K_{v \min}, K_{v \max}]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,o}$	1 тип	–	$V_c > V_v$
G_{15}	1	0	–	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,o}$	1 тип	–	$V_c \leq V_v$
G_{16}	1	0	$K_v \in [K_{v \max}, K_{v \min}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{+,o}$	1 тип	–	$V_c > V_v$
G_{17}	-1	0	$K_v \in [K_{v \min}, K_{v \max}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,o}$	1 тип	–	$V_c > V_v$
G_{18}	-1	0	–	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,o}$	1 тип	–	$V_c \leq V_v$

У наведеній таблиці знаходяться ситуації та парні маневри, що належать до першої підмножини Mn_1 , для яких характерно збільшення дистанції між судном і ціллю.

Отримані в роботі [11] результати вибору маневру виходу судна на програмну траєкторію руху носять характер першого наближення вирішення поставленого завдання. Справа в тому, що тип траєкторії повернення судна (з трьох

можливих) на програмну траєкторію визначається значеннями відносного курсу K_{oto} та швидкістю його зміни ω_{ot} . Однак значення та знак відносної кутової швидкості ω_{ot} змінюється протягом часу, навіть якщо курс змінює тільки оперуюче судно з постійною кутовою швидкістю, водночас змінюється величина відносного курсу K_{oto} . Під час маневрування суден на невеликих відстанях відбуваються значні зміни пеленгу на ціль, а реальний характер поведінки судна під час повороту відрізняється від поведінки, описаної наближеною моделлю обертального руху з постійною кутовою швидкістю. В силу зазначених причин раніше розглянутими процедурами можна робити лише наближений висновок про характер зміни дистанції між суднами протягом усього маневру повернення судна на програмну траєкторію.

Тому з метою підвищення ефективності вибору безпечного маневру виходу судна на програмну траєкторію руху пропонується метод оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, що враховує раніше отримані теоретичні результати та забезпечує як відсутність небезпечного зближення з ціллю, так і точний вихід на програмну траєкторію руху.

У даному методі використовуються три раніше розглянуті типи траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху, а реалізація методу передбачена на сучасних комп'ютерах, що володіють високою швидкодією.

Допустимість використання кожного з типів траєкторії визначається її безпекою, що характеризується співвідношенням дистанції найкоротшого зближення $\min L$ із гранично допустимою дистанцією L_d . Якщо для траєкторії виконується нерівність $\min L \geq L_d$, то траєкторія є допустимою. Якщо для певної початкової ситуації допустимими є кілька типів, то вибирається той, для реалізації якого потрібно менше часу. За витратами часу найкращим є перший тип траєкторії, потім другий тип і найбільше часу йде на реалізацію третього типу.

Слід зазначити, що перший та другий типи траєкторій виходу судна можуть бути як допустимими, так і небезпечними, тоді як третій тип (за визначенням) завжди допустимий. Тому алгоритм вибору безпечного оптимального за витратами часу маневру повернення судна на програмну траєкторію полягає в наступному.

Оскільки найкращим є перший тип траєкторії, то спочатку проводиться перевірка допустимості його реалізації, для чого слід визначити дистанцію мінімального зближення $\min L_1$ та порівняти її зі значенням гранично допустимої дистанції L_d . Величина дистанції L_d задана, а значення $\min L_1$ слід визначити.

Для цього за запропонованою в роботі моделі розраховуються параметри маневру розходження з першим типом траєкторії, що використовуються як перше наближення. Потім, використовуючи динамічну модель судна, яка найбільше адекватно описує рух судна під час маневрування, прораховують його координати $X_v(t)$, $Y_v(t)$ через невеликі інтервали часу Δt , одночасно, виходячи з параметрів руху цілі та її кутової швидкості, якщо вона виконує поворот, розраховують її

координати $X_C(t)$, $Y_C(t)$. За допомогою отриманих координат на кожний інтервал часу Δt здійснюється розрахунок поточної дистанції L_t між суднами.

Прорахувавши за допомогою комп'ютера дистанції між судном та ціллю протягом усього маневру повернення, вибирається найменша $\min L_1$, яка порівнюється з гранично допустимою L_d , у результаті визначається допустимість першого типу траєкторії повернення судна. Якщо маневр є допустимим, то отримані після його прорахунку уточнені параметри маневру повернення, методику визначення яких розглянемо пізніше, реалізуються в реальному маневрі повернення судна. У цьому випадку судно може повернутися на програмну траєкторію з мінімальними втратами часу.

Якщо ж перший тип траєкторії повернення в результаті порівняння величин $\min L_1$ і L_d виявиться неприпустимим, слід провести перевірку другого типу траєкторії повернення. Для цього за раніше отриманими аналітичними виразами проводиться розрахунок параметрів маневру повернення з використанням другого типу траєкторії, а потім, аналогічно до попереднього випадку, проводиться прорахунок координат судна, цілі та дистанції між ними. Мінімальне значення дистанції між ними $\min L_2$ і дистанції L_d визначають допустимість другого типу траєкторії повернення судна. У разі допустимості траєкторії судном провадиться реалізація маневру з уточненими під час прорахунку параметрами.

В іншому випадку проводиться розрахунок параметрів маневру третім типом траєкторії повернення, виконується його прорахунок, визначення величини $\min L_3$ та її допустимість.

За недостатнього для допустимості маневру повернення значення $\min L_3$ необхідно збільшити час проходження судна курсом ухилення, що веде до зростання величини дистанції найкоротшого зближення, та повторно прорахувати значення $\min L_3$. Для отримання допустимого маневру виходу з третім типом траєкторії повернення потрібно трохи більше трьох ітерацій.

Для підвищення точності попередніх значень параметрів маневру виходу з використанням будь-якого типу траєкторій повернення можна використовувати математичні моделі обертального руху судна, що враховують динаміку судна у поворотності. Так, у роботі [12] розроблено метод розрахунку тимчасових поправок для врахування інерційності судна під час виконання поворотів.

Для розрахунку тривалості повороту судна τ та збільшення його координат ΔX_V і ΔY_V слід використовувати третю (найточнішу) динамічну модель зміни курсу судна K під час його повороту в залежності від кута кладки пера керма β_k , яка описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з постійними коефіцієнтами, що має такий вигляд [12]:

$$T_1 T_2''' K + (T_1 + T_2)'' K + \dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

де T_1 і T_2 – постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна;

k_ω – коефіцієнт ефективності керма.

Для повороту судна використовують дві фази кладки пера керма. На першій фазі, у початковий момент часу проводиться перекидка керма на певний кут β_k і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу τ_1 . Після цього провадиться перекидка пера керма на протилежний борт на ту саму величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу τ_2 , після закінчення якого судно виходить на заданий курс, кутова швидкість повороту обертається в нуль, а перо керма наводиться в діаметральну площину судна.

Отже, до розрахунку величини часу повороту судна τ необхідно обчислити інтервали часу τ_1 і τ_2 , які у сумі дають її величину.

Очевидно, що поточне значення курсу судна на першій і другій фазах повороту має різний аналітичний вираз, тому поточне значення курсу судна на першій фазі повороту позначено через \bar{K} , а на другий – через \tilde{K} .

Значення курсу судна на першій та другій фазах повороту, які відрізняються положенням пера керма відносно діаметральної площини судна, мають наступні аналітичні вирази.

На першій фазі повороту, тривалість якої становить інтервал часу τ_1 , поточне значення курсу судна описується аналітичним виразом

$$\bar{K} = K_0 + a_\omega \left\{ t - \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \right\} / (T_1 - T_2) \right\},$$

де $a_\omega = k_\omega \beta_k$ – значення кутової швидкості повороту судна, що встановилася після перекидки пера керма на кут β_k .

На другій фазі повороту після завершення інтервалу часу τ_1 виконується перекидка пера керма на протилежний борт на кут $-\beta_k$ і впродовж інтервалу часу τ_2 відбувається отримання судна. У цьому випадку поточне значення курсу описується виразом

$$\tilde{K} = K - a_\omega t + a_\omega \left\{ 2 - \left[T_1 \exp(-t_k/T_1) - T_2 \exp(-t/T_2) \right] / (T_1 - T_2) \right\} \times \\ \times \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \right\} / (T_1 - T_2).$$

Враховуючи, що під час повороту збільшення курсу судна на першій і другій фазах має дорівнювати заданій зміні курсу, а кутова швидкість до моменту завершення повороту повинна обертатися в нуль, інтервали часу τ_1 і τ_2 знаходяться за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} \tau_1 = \tau_2 + \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-\tau_1 / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_1 / T_2)] \right\} / (T_1 - T_2) - \\ - \left\{ 2 - [T_1 \exp(-\tau_1 / T_1) - T_2 \exp(-\tau_1 / T_2)] / (T_1 - T_2) \right\} \times \\ \times \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-\tau_2 / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_2 / T_2)] \right\} / (T_1 - T_2) + K / a, \end{aligned} \quad (6)$$

де ΔK – задана зміна курсу протягом маневру.

Друге рівняння, що характеризує зв'язок τ_1 і τ_2 має вигляд

$$\begin{aligned} \tau_2 = -T_1 \ln \left\{ (T_2 / T_1) \exp(-\tau_2 / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] \right\} \times \\ \times \left\{ 2 - [T_1 \exp(-\tau_1 / T_1) - T_2 \exp(-\tau_1 / T_2)] / (T_1 - T_2) \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким чином, для розрахунку величин τ_1 і τ_2 методом простих ітерацій, задаючись попереднім значенням τ_1 , за допомогою виразу (7) обчислюється значення τ_2 , яке потім підставляється у вираз (6) для розрахунку наступного значення τ_1 . Слід зазначити, що для початкового наближення слід вибрати значення τ_1 і τ_2 , отримані з математичної моделі обертального руху першого ладу, тобто $\tau_1 = \Delta K / a_\omega$, $\tau_2 = 0$.

Збільшення координат ΔX_V і ΔY_V маневруючого судна знаходяться з виразів

$$\begin{aligned} \Delta X_V = \int_0^{\tau_1} V_V \sin [K_{VO} + \bar{K}] dt + \int_0^{\tau_2} V_V \sin [K_{VO} + K(\Delta \tau_1) + \tilde{K}] dt, \\ \Delta Y_V = \int_0^{\tau_1} V_V \cos [K_{VO} + \bar{K}] dt + \int_0^{\tau_2} V_V \cos [K_{VO} + K(\Delta \tau_1) + \tilde{K}] dt, \end{aligned}$$

причому обчислення певних інтегралів здійснюється методом Сімпсона.

За допомогою наведених виразів розраховуються початкові значення параметрів маневру повернення судна програмну траєкторію з урахуванням типу траєкторії повернення. Оскільки курс виходу K_b судна на програмну траєкторію та його програмний курс K_0 є заданими величинами, необхідно розрахувати тільки моменти часу початку і кінця поворотів t_{bn} , t_{bk} , t_{kn} і t_{kk} .

Під час перевірки допустимості маневру виходу, коли проводиться про-рахунок дистанції між суднами через невеликі інтервали часу, також фіксуються відповідні моменти часу та значення поточного курсу судна. Якщо уточнені параметри маневру повернення позначити $'t_{bn}$, $'t_{bk}$, $'t_{kn}$ і $'t_{kk}$, то очевидно, що $'t_{bn} = t_{bn}$. Значенню $'t_{bk}$ відповідає момент часу, коли під час прорахунку

маневру виходу поточне значення курсу судна K_v досягне величини курсу K_b . Цей момент часу відповідає закінченню повороту судна за найбільш адекватною математичною моделлю, що описує його рух. Отже, закінчення повороту судна на курс повернення визначається співвідношенням $t_{bk} = t(K_v = K_b)$. Надалі судно рухається прямолінійною ділянкою із постійними параметрами руху. Для визначення уточненого значення часу початку повороту на програмну траєкторію руху t_{kn} спочатку необхідно порахувати тривалість повороту судна τ_k з курсу K_b на програмний курс K_o . Для цього необхідно зафіксувати моменти часу початку зміни курсу K_b та досягнення курсу судна величини програмного курсу K_o , тобто $\tau_k = t(K_v - K_b) - t[\min(K_v - K_b)]$. За значеннями координат судна на ці моменти часу визначається нормальна відстань L_k до програмної траєкторії на момент початку повороту судна t_{kn} на момент часу t_{bk} визначається відстань L_b . За отриманими параметрами розраховується час t_{kn} за формулою

$$t_{kn} = \tilde{t}_{bk} + \frac{(L_b - L_k)}{V_v \sin(K_o - K_b)}$$

Завершальний уточнений момент часу визначається співвідношенням

$$t_{kk} = \tilde{t}_{kn} + \tilde{\tau}_k$$

Таким чином проводиться перевірка допустимості маневру повернення методом оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації з урахуванням найбільш адекватної моделі руху судна та отримання уточнених параметрів маневру.

Висновки, які можна зробити із наведених матеріалів, наступні:

1. У статті запропоновано спосіб повернення суден на програмні траєкторії руху з урахуванням їхньої координації згідно з яким кожне з суден під час маневру може вибрати один із трьох варіантів: повороту вправо, повороту вліво або продовжити слідувати незмінним курсом, і вибір парного маневру для судна та цілі залежно від початкової ситуації, яка забезпечує їх безпечне повернення на програмні траєкторії. Також суттєвою є зміна відносного курсу від зміни курсу судна та цілі. В розділі знайдено таку залежність.

2. Визначено, що парні маневри судна й цілі становлять набір із восьми можливих варіантів (за винятком варіант сталості курсів судна та цілі) і для кожної початкової ситуації обрано найбільш підходящий парний маневр з урахуванням типу траєкторій повернення на програмну траєкторію руху.

3. Здійснено розробку методу оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, який враховує раніше отримані теоретичні результати та забезпечує як відсутність небезпечного зближення з ціллю, так і точний вихід на програмну траєкторію руху. У цьому методі використано три раніше розглянуті типи траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху, а реалізація методу передбачена на сучасних комп'ютерах, що мають високу швидкодію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Pyatakov V. E. Analysis of region of the possible combined manoeuvres of divergence of ship with two targets by the change of course and his active braking. Science and Education a New Dimension. 2018. Vol. VI(186), no. 22. P. 72–75. URL: <https://doi.org/10.31174/send-nt2018-186vi22-19>
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.

11. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на 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.
12. Бурмака И. А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.

REFERENCE

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. Pyatakov V. E. Analysis of region of the possible combined manoeuvres of divergence of ship with two targets by the change of course and his active braking. Science and Education a New Dimension. 2018. Vol. VI(186), no. 22. P. 72–75. URL: <https://doi.org/10.31174/send-nt2018-186vi22-19>
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 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.

11. Kalinichenko T.V. Vybir manevra povernennya sudna na prohramnu traektoriyu rukhu bez koordynatsiyi z tsillyu // *Visnyk Odes'koho natsional'noho mors'koho universytetu: Zb. nauk. prats'*, 2023. № 3 (70). S. 47-57. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-47-57.
12. Burmaka I.A. *Upravlenie sudamy v situatsii opasnogo sblizheniya / I.A. Burmaka., E.N. Pyatakov., A.Yu. Bulgakov – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Saarbrücken (Germaniya), – 2016. – 585 s.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024

Посилання на статтю: Калініченко Т.В. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2024. № 2 (73). С. 155-169 . DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-155-169.

Article received 15.05.2024

Reference a journal artic: Kalinichenko T. Development of the vessel operational control method during the exit on the program trajectory under the current situation // *Herald of the Odesa national maritime university: Noll. scient. works*, 2024. 2 (73). P.155-169. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-155-169.