

Тимощук О.М., Мельник О.В.

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ ЗМІНОЮ КУРСУ

У статті наведено опис маневру розходження судна зміною курсу та наведено його характеристики. Розглянуто процедуру визначення граничного моменту часу, коли судно потрапляє у позицію, з якої не може розійтися з ціллю на заданій дистанції. Отримано аналітичний вираз, який формалізує можливість застосування маневру розходження зміною курсу.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, маневр розходження ухиленням, умова можливості розходження маневром ухилення.

Постановка проблеми

У стиснених районах плавання морських суден ускладняється навігаційними перешкодами та інтенсивним судноплаством, внаслідок чого створюються передумови для виникнення аварійних ситуацій.

Під час плавання у стиснених районах через швидкоплинну зміну навігаційної ситуації виникає необхідність створення сучасних методів вибору безпечного маневру розходження. До них належать використання областей неприпустимих значень параметрів руху суден. Попередження зіткнення суден, що небезпечно зближуються, у стиснених водах істотно залежить від оперативності способу вибору безпечного маневру розходження, яким найчастіше є маневр зміни курсу.

Тому розробка процедури оцінювання можливості застосування маневру розходження зміною курсу є актуальним та перспективним науковим напрямом..

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Численні роботи вітчизняних та зарубіжних науковців присвячені проблемі запобігання зіткненням суден. Для опису процесу розходження у роботі [1] використовуються методи теорії оптимальних дискретних процесів, а проблема попередження зіткнень суден докладно досліджено у роботі [2], у якій запропоновано метод гнучких стратегій їх розходження.

У роботі [3] для опису взаємодії суден під час розходження використано метод нелінійної інтегральної інваріантності, а взаємодії суден під час розходження методами теорії диференціальних ігор формалізовані у роботах [4,5].

Результати дослідження ефективності маневрів розходження пари суден наведено у роботі [6]. У монографії [7] розглянуто метод попередження зіткнення суден зміщенням на лінію паралельну траєкторії руху.

Формалізації взаємодії пари суден в разі небезпечного зближення присвячено роботу [8], а керування трьома суднами для безпечного розходження розглянуто на роботах [9,10].

Розглянуті роботи присвячені методам розходження суден у ситуації небезпечного зближення. У разі достатнього водного простору перевагу має маневр розходження зміною курсу.

Метою статті є аналіз можливості застосування стандартного маневру розходження суден зміною курсу ситуації небезпечного зближення..

Виклад основного матеріалу.

Маневр розходження зміною курсу, як показано на рис. 1 містить дві ділянки: ділянка відхилення з програмної траєкторії руху курсом ухилення K_y у момент часу початку ухилення t_y . Друга ділянка – вихід на програмну траєкторію руху з параметрами K_b – курсом виходу та t_b – момент повороту на курс виходу. Заключними характеристиками маневру розходження є час t_k і курс K_k повороту судна з ділянки виходу на програмну траєкторію та кінцевий програмний курс.

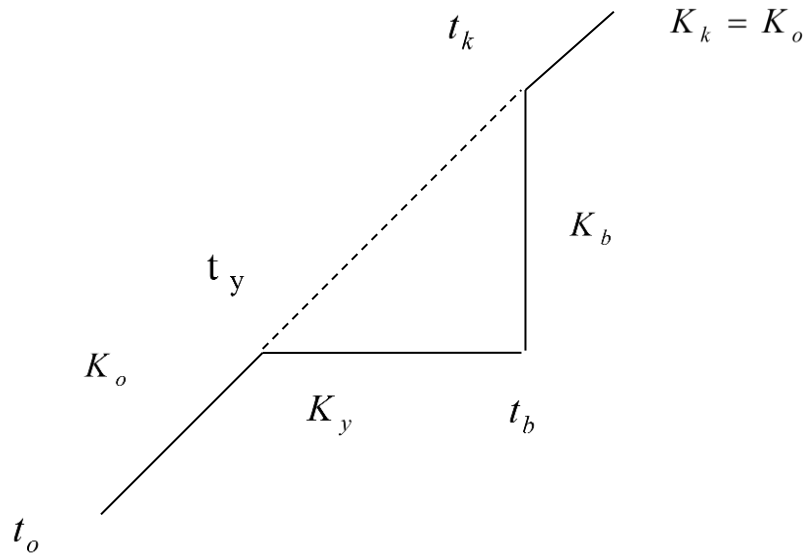


Рисунок 1 – Маневр розходження зміною курсу

Знайдемо умову, яка визначає можливість застосування маневру розходження зміною курсу судна. Насамперед, судно та ціль повинні небезпечно зближуватися. Очевидно, що підмножина маневрів розходження існує, якщо є хоча б один курс ухилення, який забезпечує розходження судна та цілі на дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ що дорівнює або є більшою за допустиму дистанцію зближення D_d .

Небезпека зіткнення виникає в разі прогнозованого потрапляння судна в безпечну область (домен) цілі, – вона вказує на майбутню неприпустиму ситуацію заздалегідь, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції судна та цілі. Очевидно, небезпека зіткнення виникає у разі, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ є меншим за значення гранично допустимої дистанції зближення D_d .

Якщо за наявності небезпеки зіткнення дистанція між суднами перевищує значення D_d та судно може своїм маневром забезпечити максимальне значення дистанції найкоротшого зближення $\max D_{\min}$, для якого $\max D_{\min} \geq D_d$, воно може застосувати маневр розходження. З часом за незмінних параметрів руху суден дистанція між ними скорочується і настає момент часу t_d , коли буде досягнуто рівність $\max D_{\min} = D_d$.

В разі подальшого зближення суден із програмними параметрами руху $\max D_{\min} < D_d$ судно потрапляє в підмножину неприпустимих позицій, причому ніяким маневром зміни курсу воно не зможе розійтися з ціллю на дистанції D_d . Тому момент часу t_d потрапляння судна в підмножину неприпустимих позицій визначає можливість використання стандартного маневру розходження.

Причому якщо $t_d > 0$, то застосування маневру розходження можливе, інакше ($t_d \leq 0$) розходження маневром зміни курсу неможливе.

Знайдемо аналітичний вираз для розрахунку моменту часу t_d , коли судно ухиляється від зіткнення зміною курсу, враховуючи співвідношення швидкостей судна та цілі. Розглянемо випадок, коли швидкість судна V_1 є більшою за швидкість цілі V_2 , тобто $\rho = \frac{V_1}{V_2} \geq 1$ (рис. 2).

В даному випадку, як показано на рис. 2, судно може лягти на будь-який відносний курс, та момент часу t_d визначається, коли судно досягає межі області неприпустимих позицій цілі, при цьому справедливою є рівність $D(t_d) = D_d$.

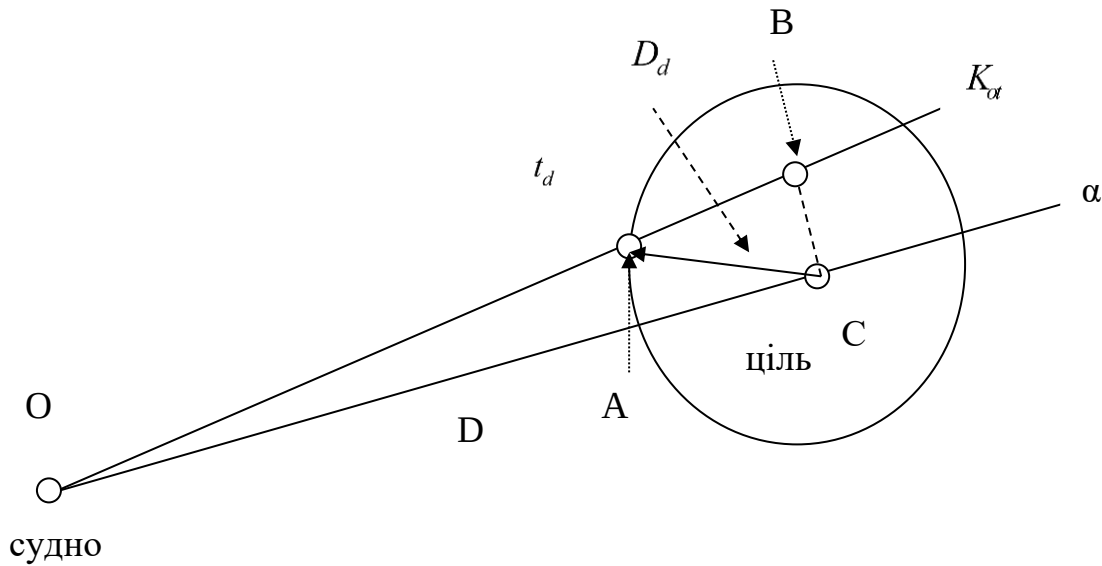


Рисунок 2 – До визначення t_d за $\rho \geq 1$

Залежність поточної дистанції $D(t)$ від часу t за незмінних параметрів відносного руху K_{ot} і V_{ot} отримана у роботі [9]:

$$D(t) = \sqrt{V_{ot}^2 t^2 + D^2 - 2DV_{ot}t \cos(K_{ot} - \alpha)},$$

де α і D – значення початкового пеленгу та відстані.

Тому можна записати рівняння:

$$D(t_d) = \sqrt{V_{ot}^2 t_d^2 + D^2 - 2DV_{ot}t_d \cos(K_{ot} - \alpha)} = D_d,$$

з якого випливає

$$V_{ot}^2 t_d^2 + D^2 - 2DV_{ot}t_d \cos(K_{ot} - \alpha) = D_d^2.$$

Останнє рівняння можна переписати у такому вигляді:

$$V_{ot}^2 t_d^2 - 2DV_{ot}t_d \cos(K_{ot} - \alpha) + D^2 - D_d^2 = 0,$$

або

$$t_d^2 - 2kt_d + q = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } k = \frac{D \cos(K_{ot} - \alpha)}{V_{ot}}, \quad q = \frac{D^2 - D_d^2}{V_{ot}^2}.$$

Розв'язуючи рівняння (1) відносно змінної t_d , отримаємо:

$$t_{d1,2} = k \pm \sqrt{k^2 - q}.$$

Підставляючи значення k і q , знайдемо корені t_{d1} і t_{d2} :

$$\begin{aligned} t_{d1} &= \frac{D \cos(K_{ot} - \alpha)}{V_{ot}} + \sqrt{\frac{D^2 \cos^2(K_{ot} - \alpha)}{V_{ot}^2} - \frac{D^2 - D_d^2}{V_{ot}^2}} = \\ &= \frac{1}{V_{ot}} \left\{ D \cos(K_{ot} - \alpha) + \sqrt{D_d^2 - D^2 [1 - \cos^2(K_{ot} - \alpha)]} \right\}, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} t_{d1} &= \frac{1}{V_{ot}} \left\{ D \cos(K_{ot} - \alpha) + \sqrt{D_d^2 - D^2 \sin^2(K_{ot} - \alpha)} \right\}, \\ t_{d2} &= \frac{1}{V_{ot}} \left\{ D \cos(K_{ot} - \alpha) - \sqrt{D_d^2 - D^2 \sin^2(K_{ot} - \alpha)} \right\}. \end{aligned}$$

Моменту часу t_d досягнення судном, що оперує, межі області неприпустимих позицій відповідає кореню t_{d2} рівняння (1) – точка А на рис. 2. Отже:

$$t_d = \frac{1}{V_{ot}} \left\{ D \cos(K_{ot} - \alpha) - \sqrt{D_d^2 - D^2 \sin^2(K_{ot} - \alpha)} \right\}. \quad (2)$$

Якщо ж швидкість судна менша за швидкість цілі, тобто $\rho \leq 1$, те, як показано в роботі [9], відносний курс у разі зміни курсу судна K_1 в діапазоні від 0 до 2π може знаходитися в секторі, обмеженому максимальним $K_{ot \max}$ та мінімальним $K_{ot \min}$ значеннями, причому:

$$K_{ot \min} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \quad \text{і} \quad K_{ot \max} = \pi + K_2 + \arcsin \rho.$$

Очевидно, максимальне значення дистанції найкоротшого зближення $\max D_{\min}$ досягається в разі екстремального курсу відхилення $K_{ot \text{ex}}$ ($K_{ot \max}$ або $K_{ot \min}$).

Для визначення моменту часу t_d , тобто повороту на екстремальний курс ухилення $K_{ot \text{ex}}$ за $\rho \leq 1$, наведемо рис. 3, з якого випливає:

$$t_d = \frac{OM}{V_{otn}},$$

де V_{otn} – початкова відносна швидкість.

Шукане значення визначається з виразу:

$$OM = \frac{x}{\sin(K_{otn} - K_{otex})},$$

де K_{otn} – початковий відносний курс.

У свою чергу,

$$x = y - D_d \text{ і } y = \Delta_y D \sin(K_{otex} - \alpha),$$

де $\Delta_y = \text{sign}[\sin(K_{otex} - K_{otn})] = \pm 1$.

Тому

$$t_d = \frac{\Delta_y D \sin(K_{otex} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{otex})}. \quad (3)$$

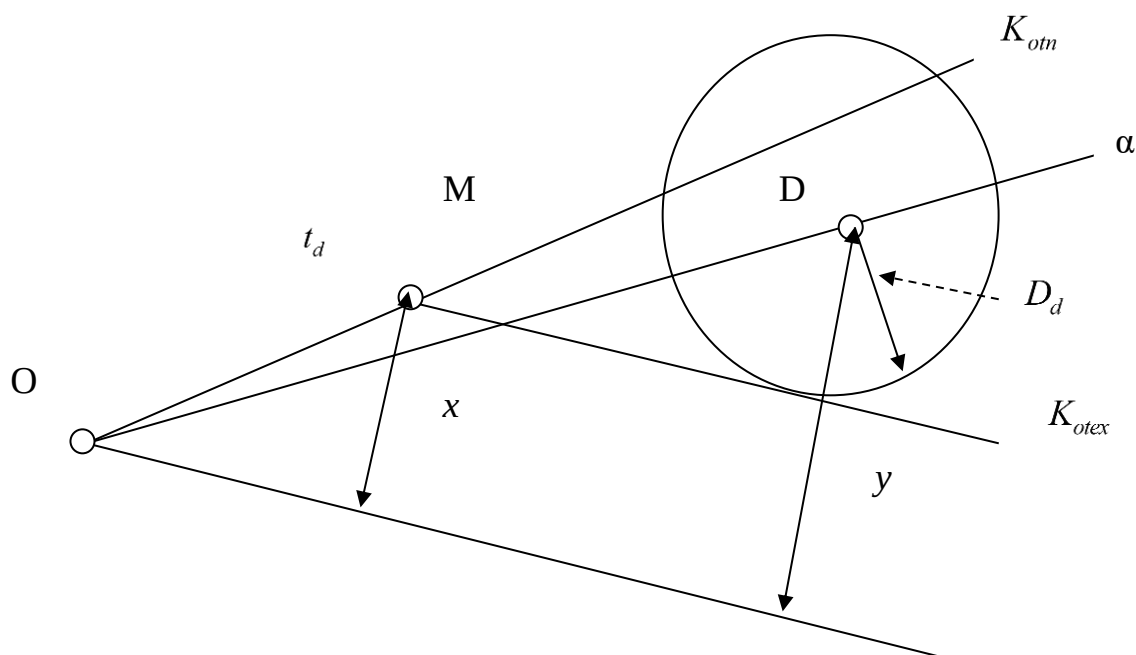


Рисунок 3 – Визначення величини t_d за $\rho < 1$

Отже, для випадку $\rho < 1$ розрахунок моменту часу t_d виконується за допомогою виразу (3). Тому у разі вибору судном, що оперує, маневру розходження зміною курсу момент часу t_d розраховується за допомогою виразу:

$$t_d = \begin{cases} \frac{D \cos(K_{otn} - \alpha) - \sqrt{D_d^2 - D^2 \sin^2(K_{otn} - \alpha)}}{V_{otn}}, & \rho \geq 1 \\ \frac{\Delta_y D \sin(K_{otex} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{otex})}, & \rho < 1 \end{cases}.$$

Таким чином, аналітично умова можливості застосування маневру розходження ухиленням полягає у справедливості нерівності $t_d > 0$.

Висновки

1. Наведено опис маневру розходження судна ухиленням та його характеристики.
2. Запропоновано визначення поняття граничного моменту часу t_d , коли судно потрапляє в підмножину неприпустимих позицій, у яких воно не може розійтися з ціллю на заданій дистанції.
3. Отримано аналітичні залежності для умови можливості застосування маневру розходження ухиленням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. – № 12. – С. 22–24.
2. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
3. Павлов В. В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В. В. Павлов, Н. И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 68. – С. 43–45.
4. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. – 1978. – №5. – С. 35–40.
5. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. – Vol. 2. – London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285–1292.
6. 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.
7. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
8. 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.
9. 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.
10. Бурмака И. А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 18–23.

REFERENCES

1. Kulikov A. M. Optimum management by divergence of vessels / A. M. Kulikov, and V. V. Poddubnyy // Sudostroenie. – 1984. – №12. – P. 22–24.

2. 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.
3. Pavlov V. V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ V. V. Pavlov, N. I. Senshin // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. – 1985. – №68. – P. 43–45.
4. Kudryashov V. E. Synthesis of algorithms of safe management by a ship at divergence with a few objects / V. E. Kudryashov // Sudostroenie. – 1978. – №5. – P. 35–40.
5. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. – Vol. 2. – London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285–1292.
6. 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.
7. Vagushchenko L. L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / L. L. Vagushchenko. – Odessa: Feniks. – 2013. – 180 p.
8. 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.
9. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / I. Burmaka, E. Pyatakov, A. Bulgakov. – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Saarbryukken (Germany), – 2016. – 585 p.
10. Burmaka I. A. Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses/ I. A. Burmaka, A. Y. Bulgakov // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. – 2014. – №20. – P. 18–23.