

MANAGING SHIPS' CLOSE-QUARTERS SITUATIONS**КЕРОВАНІСТЬ СИТУАЦІЄЮ ПІД ЧАС НЕБЕЗПЕЧНОГО ЗБЛИЖЕННЯ СУДЕН**

I.A. Burmaka, D.Sc., professor, M. S. Alekseichuk, PhD, professor, A. I. Burmaka, PhD, associate professor

І.О. Бурмака, д.т.н., професор, М.С. Алексейчук, к.т.н., професор, О. І. Бурмака, к.т.н., доцент

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет "Одеська Морська Академія", Україна

ABSTRACT

The collision avoidance process involves transitioning from a close-quarters situation to a safe navigational condition through an effective maneuver. A critical factor in this process is the controllability of the close-quarters situation, which reflects the potential to resolve a hazardous approach using maneuvering actions.

This paper investigates the controllability of ship approach situations from the perspective of collision prevention by altering a vessel's heading. The study defines the conditions under which a heading maneuver is feasible, highlighting the existence of a subset of heading changes that ensure a safe closest point of approach (CPA), equal to or exceeding the maximum allowable distance.

The concept of the limiting moment is introduced, representing the point at which a ship enters a subset of unacceptable positions where passing at a specified safe CPA becomes unachievable. Analytical expressions are derived to estimate this moment for two scenarios: when the ship's speed exceeds the target's speed and when it is slower.

The research further proposes a method to assess the controllability of close-quarters situations based on the ratio of feasible relative courses to all possible relative courses during a 360° course adjustment. An analytical expression is presented, showing that controllability depends on the vessel-to-target speed ratio. When the ship's speed exceeds the target's, controllability equals one; otherwise, it does not exceed 0.5.

This study provides a framework for evaluating navigational safety and improving decision-making during hazardous vessel approaches.

Keywords: navigational safety, ship collision prevention, close-quarters maneuvering, heading adjustment, controllability, closest point of approach (CPA).

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Успішне вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння веде до покращення охорони людського життя на морі, а також до зниження шкоди навколишньому середовищу, майну та виробничим процесам.

Плавання морських суден у обмежених районах ускладнене інтенсивним судноплаванням та навігаційними перешкодами, які створюють передумови виникнення аварійних ситуацій. Тому у стиснених водах відбувається понад 80 % усіх навігаційних аварій, що підтверджує велику складність умов плавання у стиснених водах.

Основною особливістю плавання в обмежених районах є швидкоплинна зміна навігаційної ситуації, що зумовлює необхідність розробки простих у застосуванні та оперативних методів забезпечення безпечного розходження суден у ситуаціях їх небезпечного зближення.

Процес розходження передбачає зміну ситуації небезпечного зближення, що виникла, на допустиму безпечну ситуацію за допомогою маневру розходження. Тому для процесу розходження важливою характеристикою є керованість ситуацією зближення, що показує потенційну можливість зміни маневром розходження. Цим обумовлено розгляд керованості ситуації зближення. Таким чином, дослідження керованості ситуацією зближення, чому присвячена ця стаття, є актуальним та перспективним науковим напрямом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Багато робіт вітчизняних та зарубіжних вчених присвячені проблемі забезпечення безпечного розходження суден. Так, основні засади управління процесом розходження суден у ситуації небезпечного зближення розглянуті у роботі [1], а робота [2] присвячена дослідженню методів локально-незалежного управління та у ній запропоновано метод формування гнучких стратегій розходження, які враховують основні чинники. В роботі [3] розглянуто формалізацію взаємодії суден при небезпечному зближенні і у залежності від його типу рекомендується вибір стратегії розходження для попередження зіткнення. Екстрену стратегію розходження при надмірному зближенні суден запропоновано у роботі [4], а спосіб вибору оптимального стандартного маневру розходження пари суден запропоновано у роботі [5]. Урахування навігаційних перешкод та інерційності судна при розрахунку параметрів маневру розходження розглянуто на роботах [6, 7].

Основні методи врахування вимог COLREGs в ситуаціях небезпечного зближення суден, які пропонуються для використання в системах розходження, аналізуються в роботі [8]. Аналіз показав, що застосування COLREGs пов'язано з труднощами, для подолання яких необхідно більш чітко визначення ряду термінів і понять у нормативних документах. Більшість фахівців вважає, що COLREGs не можуть мати кількісного вираження для того, щоб бути універсальними, а визначення чисельних значень параметрів розходження для ситуації зближення повинна виконувати сама система.

Особливості розходження суден у морі шляхом попередження їх зіткнення зміщенням на лінію паралельну шляху розглянуті в монографії [9].

В роботі [10] запропоновано систему формування маневру розходження, яка задовольняє вимогам COLREGs. Систему буде реалізовано і проведено тестування на ходових випробуваннях автономного безпілотного надводного судна та на тренажерах. Наголошується на важливості програмного забезпечення для попередження зіткнення суден.

У роботах [11, 12] наголошується, що завдання вибору оптимального маневру розходження відрізняється високим рівнем складності, з урахуванням того, що процес управління рухом судна є багатовимірним та нестаціонарним, а задачі розходження суден притаманний ігровий характер.

Гібридну тришарову систему попередження зіткненням для автономних апаратів, яка формалізує Правила 8 і 13-17 COLREGs, розглянуто у роботі [13]. В склад системи входить високорівневий плануючий модуль, який розраховує оптимальний маневр розходження з урахуванням COLREGs.

Опис процесу розходження суден методами диференціальної різницевої гри запропоновано у роботі [14].

У статті [15] для ситуації розходження з декількома небезпечними суднами пропонується метод максимальної зміни курсу і мінімальної зміни швидкості. Відмічається його ефективність для попередження зіткнень кількох суден.

У роботі [16] викладено теоретичне обґрунтування автономної судової системи ухилення від зіткнення, в ній розглянуто алгоритм ухилення від зіткнення. Наведено вимоги до автономної навігації з урахуванням факторів, що впливають на процес ухилення від зіткнення. Показано, що дослідження з автоматизації управління судном можуть проводитись у класичному чи комп'ютерному варіанті. Класичний варіант заснований на математичних

моделях, а при комп'ютерному варіанті використаний штучний інтелект, тобто еволюційні алгоритми, логіка фуззі, експертні методи, нейромережі та комбінації цих методів.

В статтях [17, 18] розглянуто основні методи автоматичного розв'язання ситуацій небезпечного зближення суден, а також приведено результати проведеного аналізу.

Для оцінки ефективності методів розходження суден необхідно розглянути можливість зміни небезпечної ситуації наближення ухиленням маневруючого судна.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціллю статті є аналіз керованості ситуацією зближення судном при зміні його курсу.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Під керованістю судном ситуацією небезпечного зближення мається на увазі можливість змінити прогнозовану ситуацію небезпечного зближення на ситуацію зближення, що належить підмножині безпечних ситуацій. У цій статті зміни ситуації небезпечного зближення розглянемо маневр розходження зміною курсу судна.

Маневр розходження зміною курсу характеризується курсом ухилення K_y та моментом часу t_y початку ухилення. Розглянемо умову, яка характеризує можливість застосування маневру розходження зміною курсу судна. Для виконання цієї умови судно та цілі повинні небезпечно зближуватися. При цьому підмножина маневрів розходження зміною курсу існує, якщо є хоча б один курс ухилення, який забезпечує розходження судна та цілі на дистанції найкоротшого зближення D_{\min} рівної або більшої гранично допустимої дистанції зближення D_d .

Небезпека зіткнення виникає при прогнозованому попаданні судна в безпечну область (домен) цілі, - вона вказує на майбутню неприпустиму ситуацію заздалегідь, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції судна та цілі, Небезпека зіткнення має умовний характер, оскільки на її істинність впливають можливі дії суден до досягнення неприпустимої ситуації. Вочевидь, небезпека зіткнення виникає у разі, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення D_{\min} менше значення гранично допустимої дистанції зближення D_d .

Якщо за наявності небезпеки зіткнення дистанція між суднами перевищує значення D_d і судно може своїм маневром забезпечити максимальне значення дистанції найкоротшого зближення $\max D_{\min}$, при котрій $\max D_{\min} \geq D_d$, воно може застосувати маневр розходження зміною курсу. З часом при незмінних параметрах руху суден дистанція між ними скорочується і настає момент часу, коли досягається рівність $\max D_{\min} = D_d$.

При подальшому зближенні суден із програмними параметрами руху $\max D_{\min} < D_d$, і судно потрапляє у підмножину неприпустимих позицій, причому ніяким маневром зміни курсу воно не зможе розійтися з ціллю в дистанції D_d . Тому момент часу t_d потрапляння судна в підмножину неприпустимих позицій визначає можливість використання маневру розходження зміною курсу. Причому, якщо $t_d > 0$, то застосування маневру розходження можливе, інакше ($t_d \leq 0$) розходження маневром зміною курсу неможливе.

Визначимо аналітичний вираз до розрахунку моменту часу t_d , коли судно ухиляється від зіткнення зміною курсу, враховуючи співвідношення швидкостей судна і цілі. Спочатку

розглянемо випадок, коли швидкість судна V_1 більша за швидкість цілі V_2 , тобто $\rho = \frac{V_1}{V_2} \geq 1$

(рис. 1).

У цьому випадку судно може лягти на будь-який відносний курс [2] і момент часу визначається, коли судно досягає межі області неприпустимих позицій цілі, при цьому справедлива рівність $D(t_d) = D_d$.

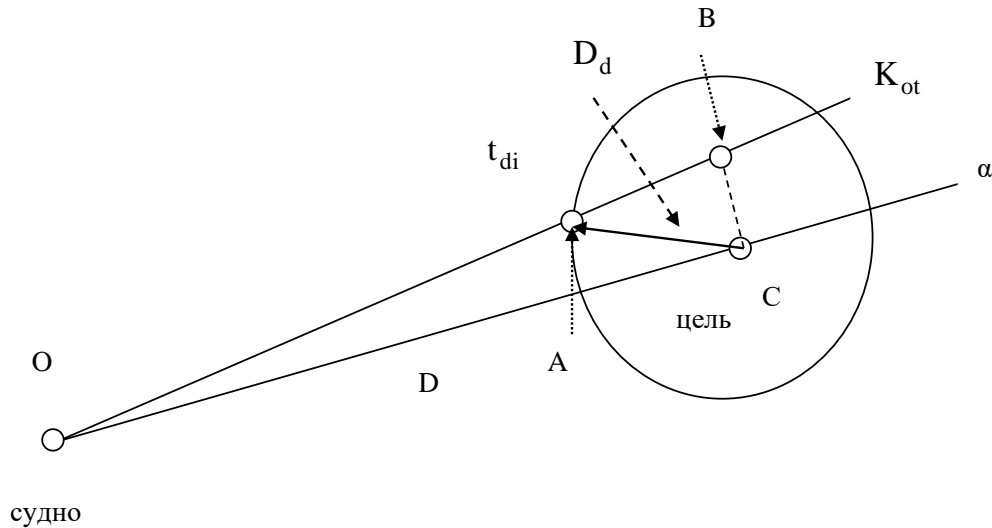


Рис. 1. Визначення t_d при $\rho \geq 1$

У роботі [1] отримано залежність поточної дистанції $D(t)$ від часу при незмінних параметрах відносного K_{ot} руху та V_{ot} :

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

де α і D - початкові значення пеленга і дистанції.

Тому можливо записати:

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

з якого випливає

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

Звідки:

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

$$t_d^2 - 2kt_d + q = 0, \tag{1}$$

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

Вирішуючи рівняння (1) щодо змінної t_d , отримуємо:

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

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

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

Звертаємо увагу, що моменту часу t_d досягнення судном, що оперує, кордону області неприпустимих позицій відповідає корінь t_{d2} рівняння (1), - точка А на рис. 1. Тому:

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

Якщо швидкість судна менша за швидкість цілі, тобто $\rho \leq 1$, то, як показано в роботі [1], відносний курс при зміні курсу судна K_1 в діапазоні від 0 до 2π може знаходитися в секторі, обмеженому максимальним K_{otmax} і мінімальним K_{otmin} значеннями, причому:

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \text{ і } K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \rho. \quad (3)$$

Очевидно, максимальне значення дистанції найкоротшого зближення $\max D_{min}$ досягається при екстремальному курсі відхилення K_{otex} (K_{otmax} або K_{otmin}). Для визначення моменту часу t_d , тобто повороту на екстремальний курс ухилення K_{otex} при $\rho \leq 1$, наведемо рис. 2, 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.

В свою чергу,

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

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

Тому

$$t_d = \frac{\Delta_y D \sin(K_{otex} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{otex})}. \quad (4)$$

Тому для випадку $\rho < 1$ розрахунок моменту часу t_d провадиться за допомогою виразу (4). Отже, у разі вибору маневру розходження оперуючим судном зміною курсу момент часу t_d розраховується за допомогою виразу:

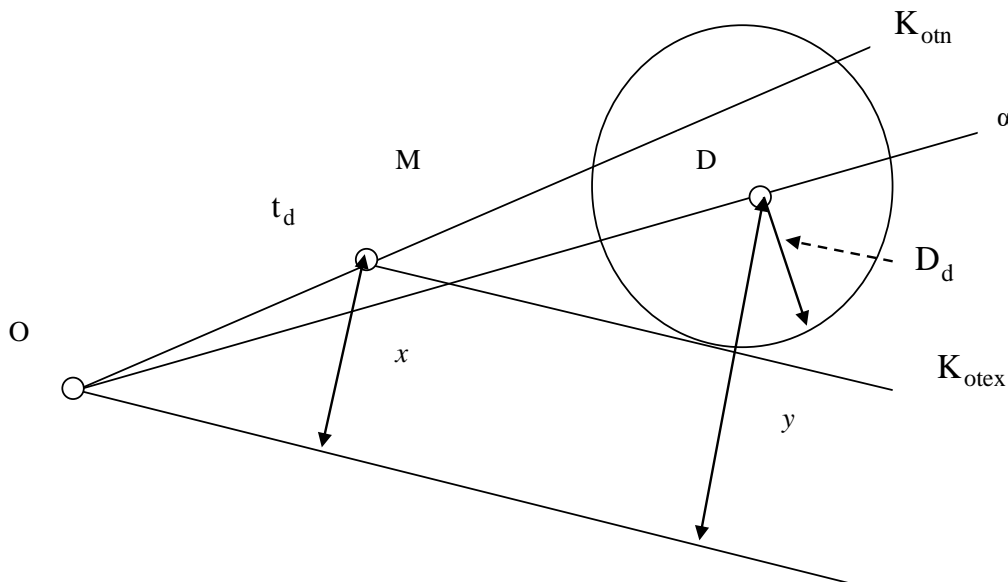


Рис. 2. Визначення величини t_d при $\rho < 1$

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

Таким чином, аналітична умова можливості застосування маневру розходження ухиленням полягає у справедливості нерівності $t_d > 0$. У разі можливості застосування маневру розходження зміною курсу, тобто при $t_d > 0$, можливо провести оцінку керованості судном ситуацією небезпечного зближення. Розглянемо це питання докладніше.

Оскільки ситуації небезпечного зближення характерно те, що дистанція найкоротшого зближення D_{min} менше допустимої станції D_d , то безпечне розходження можливе збільшенням D_{min} до значення не меншого D_d . Враховуємо, що:

$$D_{\min} = |D \sin(K_{\text{от}} - \alpha)|,$$

тому збільшення D_{\min} можливо лише зміною відносного курсу $K_{\text{от}}$. Отже, керованість судном ситуацією небезпечного зближення визначається можливістю судна забезпечити довільний відносний курс зміною свого курсу.

Очевидно, що з таких позицій визначення керованості судном ситуацією небезпечного зближення як її оцінку Q_{us} доцільно вибрати відношення множини M_s відносних курсів, які можливі при зміні курсу судна на 360° , до множини M_Σ всіх можливих відносних курсів.

Звертаємо увагу на те, що $M_\Sigma = 2\pi$. Тому. $Q_{\text{us}} = \frac{M_s}{2\pi}$.

При маневруванні судна з більшою, ніж у цілі, швидкістю зміна його курсу на 2π веде до зміни відносного курсу, як показано у роботі [1], також на 2π . Тож у цьому разі $M_s = 2\pi$ і $Q_{\text{us}} = 1$.

При маневруванні судна, швидкість V_1 якого менша за швидкість цілі V_2 , при зміні його курсу на 2π відносний курс змінюється в секторі, обмеженому відносними курсами $K_{\text{отmin}}$ і $K_{\text{отmax}}$. Як раніше вказувалося (3), дані відносні курси визначаються виразами $K_{\text{отmin}} = \pi + K_2 - \arcsin \rho$ та $K_{\text{отmax}} = \pi + K_2 + \arcsin \rho$.

Отже, множина M_s відносних курсів характеризується дугою $s = 2 \arcsin \rho$, а оцінка керованості $Q_{\text{us}} = \frac{\arcsin \rho}{\pi}$.

Підсумовуючи вищевикладене, можна записати вираз для оцінки керованості судном ситуацією небезпечного зближення:

$$Q_{\text{us}} = \begin{cases} 1, & \text{if } \rho > 1; \\ \frac{\arcsin \rho}{\pi}, & \text{if } \rho \leq 1. \end{cases}$$

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Запропоновано визначення поняття граничного моменту часу t_d , коли судно потрапляє у підмножину неприпустимих позицій, у яких воно може розійтися з ціллю в заданій дистанції.
2. Розглянуто поняття керованості ситуацією зближення судном зміною його курсу.
3. Запропоновано оцінку керованості ситуацією зближення судном та отримано аналітичний вираз для її розрахунку.
4. Показано, що характеристика керованості ситуацією зближення залежить від величини відношення швидкості судна та цілі. Якщо швидкість судна більша за швидкість цілі, то характеристика дорівнює одиниці, в іншому випадку вона не перевищує 0,5.

Надалі доцільна розробка способу компенсації ситуації небезпечного зближення для попередження зіткнення суден.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бурмака И.А. Управление суднами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
- [2] Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

- [3] Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
- [4] Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
- [5] Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
- [6] Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
- [7] Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103 - 107.
- [8] Wróbel K., Gil M., Huang Y., Wawruch R. The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques. - A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships. Sustainability. 14, 2022, 16516.
- [9] Вагущенко Л.Л. Расхождение с суднами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
- [10] Jesús A. García Maza, Reyes Poo Argüelles. COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. Ocean Engineering 261. 112029, 2022. 1-14.
- [11] 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.
- [12] Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.
- [13] Eriksen B-OH, Bitar G, Breivik M and Lekkas A.M/ Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17. Front. Robot. AI 7:11. 2020.
- [14] Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71 - 78.
- [15] Ahmed, Y.A.; Hannan, M.A.; Oraby, M.Y.; Maimun, A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. J. Mar. Sci. Eng. 9, 2021, 790.
- [16] Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
- [17] Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. Safety Science, 121, 2020. 451-473.
- [18] Lazarowska, A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing. Remote Sens. 13, 2021. 3265.

REFERENCES

- [1] Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbryukken (Germany), – 2016. - 585 p.
- [2] Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I.Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.

- [3] Pyatakov E. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A., Kherson: Grin D.S., 2015. - 312 p.
- [4] Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
- [5] Safin I.V. Choice of optimum maneuver of divergence / I.V. Safin // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2002.- №7. - p. 115 -120.
- [6] Burmaka Y.A. Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics / Burmaka Y.A.// Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. - 2005.- №10. - P. 21 – 25.
- [7] Petrichenko E.A. Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers/ Petrichenko E.A. // Sudovozhdenie.- 2003.- №6 .- p. 103 – 107.
- [8] Wróbel K., Gil M., Huang Y., Wawruch R. The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques. - A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships. Sustainability. 14, 2022, 16516.
- [9] Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
- [10] Jesús A. García Maza, Reyes Poo Argüelles. COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. Ocean Engineering 261. 112029, 2022. 1-14.
- [11] 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.
- [12] Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.
- [13] Eriksen B-OH, Bitar G, Breivik M and Lekkas A.M/ Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17. Front. Robot. AI 7:11. 2020.
- [14] Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71 - 78.
- [15] Ahmed, Y.A.; Hannan, M.A.; Oraby, M.Y.; Maimun, A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. J. Mar. Sci. Eng. 9, 2021, 790.
- [16] Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
- [17] Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. Safety Science, 121, 2020. 451-473.
- [18] Lazarowska, A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing. Remote Sens. 13, 2021. 3265.