

## MANEUVER OF RETURNING THE VESSEL TO THE SET TRACK AFTER PASSING THE TARGET

### МАНЕВР ПОВЕРНЕННЯ СУДНА НА ЗАДАНУ ТРАЄКТОРІЮ РУХУ ПІСЛЯ РОЗХОДЖЕННЯ З ЦІЛЛЮ

**T. Kalinichenko<sup>1</sup>, senior lecturer, O. Tymoshchuk<sup>1</sup>, D.Sc., professor,  
G. Tomchakovsky<sup>2</sup>, senior lecturer**

**Т. В. Калініченко<sup>1</sup>, ст. викладач, О. Н. Тимошук<sup>1</sup>, д.т.н., професор,  
Г. Г. Томчаковський<sup>2</sup>, ст. викладач**

<sup>1</sup>State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

<sup>1</sup>Державний університет інфраструктури та технологій, Україна

<sup>2</sup>Odessa National Maritime University, Ukraine

<sup>2</sup>Одеський національний морський університет, Україна

#### ABSTRACT

*This paper proposes a method of decomposing a set of initial bearings into subsets, each of which corresponds to a type of vessel passing strategy based on their initial parameters and the nature of the close-quarters situation. The method aims to perform a vessel evasive action and return it to the programmed (given) course.*

*The paper investigates the problem of collision avoidance between vessels during their passing using methods of the theory of optimal discrete processes. The paper determines the most hazardous initial vessel bearing in a situation of approaching a target (another vessel, hereafter referred to as the target vessel or TV) by decomposing the set of initial bearings into subsets based on vessel movement and distance between them in the case of a close-quarters situation.*

*The paper examines in detail the process of vessel evasive action in a close-quarters situation with a target vessel using computer simulation models in various initial conditions to choose the most optimal safe vessel passing strategy. The paper discusses the peculiarity of choosing possible safe vessel passing strategies.*

*The paper examines different types of vessel return courses to the programmed course, depending on the situation of close-quarters situation with a target vessel, using computer simulation models. The paper determines possible risks and hazards that arise when returning the vessel to the given course during the safe vessel passing process with a target vessel.*

*The paper presents examples of typical vessel passing situations with a target vessel at short distances using computer simulation models, including the circling maneuver of a vessel during passing with another vessel and overtaking maneuver of one vessel by another.*

**Keywords:** safety of navigation, prevention of collision of vessels, passing of vessels by evasion, the maneuver of returning the vessel to the programmed track.

#### **Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Плавання морських суден у стиснених районах значно ускладнюється навігаційними перешкодами та інтенсивним судноплаванням, внаслідок чого виникають передумови аварійних ситуацій. Стиснені води є складними районами плавання, в яких відбувається переважна більшість усіх навігаційних аварій, що свідчить про велику складність умов плавання у стиснених водах.

Під час розходження судна з небезпечною ціллю на малих відстанях у стиснених водах небезпека зіткнення може виникнути не тільки в разі ухилення, але й на ділянці виходу на задану траєкторію руху. Попередженню зіткнення суден у таких ситуаціях присвячено цю статтю.

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

Питанням попередження зіткнень суден присвячено численні роботи вітчизняних та зарубіжних науковців. У роботі [1] для опису процесу розходження використовуються методи теорії оптимальних дискретних процесів, а в роботі [2] докладно досліджено проблему попередження зіткнень суден та запропоновано метод гнучких стратегій їх розходження.

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

У роботі [6] наведено результати дослідження ефективності маневрів розходження кількох суден. Особливості розходження суден у морі шляхом попередження їх зіткнення зміщенням на лінію паралельну шляху розглянуті в монографії [7].

Робота [8] присвячена формалізації взаємодії пари суден в разі небезпечного зближення, а в роботах [9,10] розглянуто керування трьома суднами для безпечного розходження.

В роботах [11,12] розглянуто процес вибору належної стратегії маневру для безпечного розходження суден.

Наведені роботи присвячені методам розходження суден за їх локально-незалежному керуванні в ситуації небезпечного зближення. При достатньому водному просторі найбільш ефективним є маневр розходження зміною курсу, яке має бути досить значним для того, щоб бути поміченим іншим судном.

### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

Метою статті є аналіз маневрів повернення судна на задану траєкторію руху після розходження з ціллю.

### **Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

У найпростішому випадку, коли ситуація небезпечного зближення виникає у відкритому морі за відсутності інших суден у районі можливого зіткнення, в разі вибору лише безпечного ухилення, а не оптимального маневру розходження, а також в разі зближення суден на зустрічних курсах, можна вважати, що небезпека зіткнення існує лише на ділянці ухилення.

У загальному випадку загроза зіткнення найімовірніша під час плавання у стиснених водах, що характеризуються високою щільністю інтенсивності руху суден та наявністю численних навігаційних небезпек. У таких умовах плавання вихід на програмну траєкторію є частиною стратегії безпечного розходження суден. Більше того, навіть на вільній від заважаючих суден і навігаційних небезпек акваторії при небезпечному зближенні суден на курсах, що перетинаються, і обгоні, зіткнення можливі, як на ділянці ухилення, так і на ділянці повернення на програмну траєкторію руху.

У роботах [2, 8] до стратегії розходження крім ділянки ухилення судна із заданою траєкторією було також включено ділянку повернення на неї, а розрахунок параметрів стратегії проводився з урахуванням обмежень на безпечне розходження для обох ділянок.

Детальне дослідження проблеми попередження зіткнень суден показало, що залежно від початкової відносної позиції пари суден, що небезпечно зближуються, параметрів їхнього руху та інерційних характеристик, судна можуть перебувати в різних за загрозою зіткнення підмножинах початкових позицій, що вимагає застосування індивідуальних стратегій розходження. Декомпозиція множини початкових позицій на підмножини  $P_{ni}$  ( $i = 1...3$ )

проводиться за допомогою двох гранично допустимих дистанцій  $l_{d1}$  і  $l_{d2}$  ( $l_{d1} > l_{d2}$ ), які розраховуються за допомогою спеціальної процедури.

Якщо судно здатне розійтися з ціллю у дистанції не меншій за гранично-допустиму дистанцію  $l_{d1}$ , то реалізувалася підмножина початкових позицій  $P_{n1}$ , якій відповідає перша стратегія розходження  $D_1(t_y, K_y)$ . Ця стратегія полягає в тому, що незалежно від співвідношення швидкостей суден розраховується маневр, який містить момент початку ділянки ухилення  $t_y$  та курс ухилення  $K_y$ , що дозволяють судну розійтися з ціллю у дистанції  $l_{d1}$ .

У разі, якщо судно з початкової позиції за будь-якого курсу ухилення не може забезпечити дистанцію найкоротшого зближення  $D_{\min}$  меншу за першу гранично допустиму дистанцію  $l_{d1}$ , але більшу, ніж величина  $l_{d2}$ , то має місце підмножина початкових позицій  $P_{n2}$ , якій відповідає друга стратегія розходження  $D_2(K_y = K_{\text{extr}})$ , що забезпечує найбільшу безпеку розходження суден максимальною дистанцією найкоротшого зближення  $D_{\min}$ . Оскільки  $\max[D_{\min}]$  досягається за екстремального курсу  $K_{\text{otextr}}$ , то цей курс є параметром стратегії  $D_2$ , а ухилення починається в нульовий момент часу, тобто в момент початку виконання маневру розходження.

Найбільш небезпечною є ситуація, коли судно потрапляє у підмножину небезпечних позицій  $P_{n3}(\max[D_{\min}] < l_{d2})$ , і виникає ситуація надмірного зближення, в якій судно мінімізує відносну швидкість зближення з ціллю збільшуючи інтервал часу до позиції мінімального зближення. Для цього судно лягає на курс, що дорівнює зворотному пеленгу на друге судно, залучаючи друге судно у взаємодію, щоб спільними зусиллями компенсувати ситуаційне збурення. У цьому полягає третя стратегія розходження  $D_3$ .

Комп'ютерне імітаційне моделювання застосування стратегій розходження показало, що під час розходження суден на невеликих відстанях у разі успішного ухилення може бути загроза зіткнення суден під час повернення їх у програмну траєкторію руху, що зумовлює необхідність їх узгоджених дій і на цьому етапі процесу розходження.

Здійснюючи ухилення, судно реалізує криволінійну траєкторію спочатку в одну сторону, яка є ділянкою ухилення, а потім змінює її в іншу сторону, виходячи на курс повернення до програмної траєкторії, як показано на рис. 1. За невеликих початкових відстаней немає прямолінійних ділянок ухилення, тобто перехідний процес ухилення трансформується у перехідний процес повернення до програмної траєкторії. Для такого маневру розходження немає аналітичного виразу для розрахунку моментів часу переходу від ухилення до повернення на програмну траєкторію.

На рис. 2 звертаємо увагу на те, що ціль виконувала ухилення в лівий бік, а для повернення на програмну траєкторію змінювала курс праворуч без прямолінійної ділянки між ухиленням і поверненням на програмну траєкторію. Судно робило ухилення теж у лівий бік, але для повернення на задану траєкторію продовжувало рух у той самий бік, здійснюючи повну циркуляцію.

Без належних аналітичних розрахунків, що забезпечуються математичною моделлю, в результаті наведеного прикладу маневру розходження судна можуть зіткнутися на етапі повернення на задані траєкторії руху.

На рис. 3 показано ситуацію небезпечного зближення суден на малих відстанях. Для безпечної розходження судна виконали циркуляції у різні сторони (судно вправо, а ціль вліво), внаслідок чого, повертаючись на задані траєкторії, судна опинилися у ситуації неминучого зіткнення.

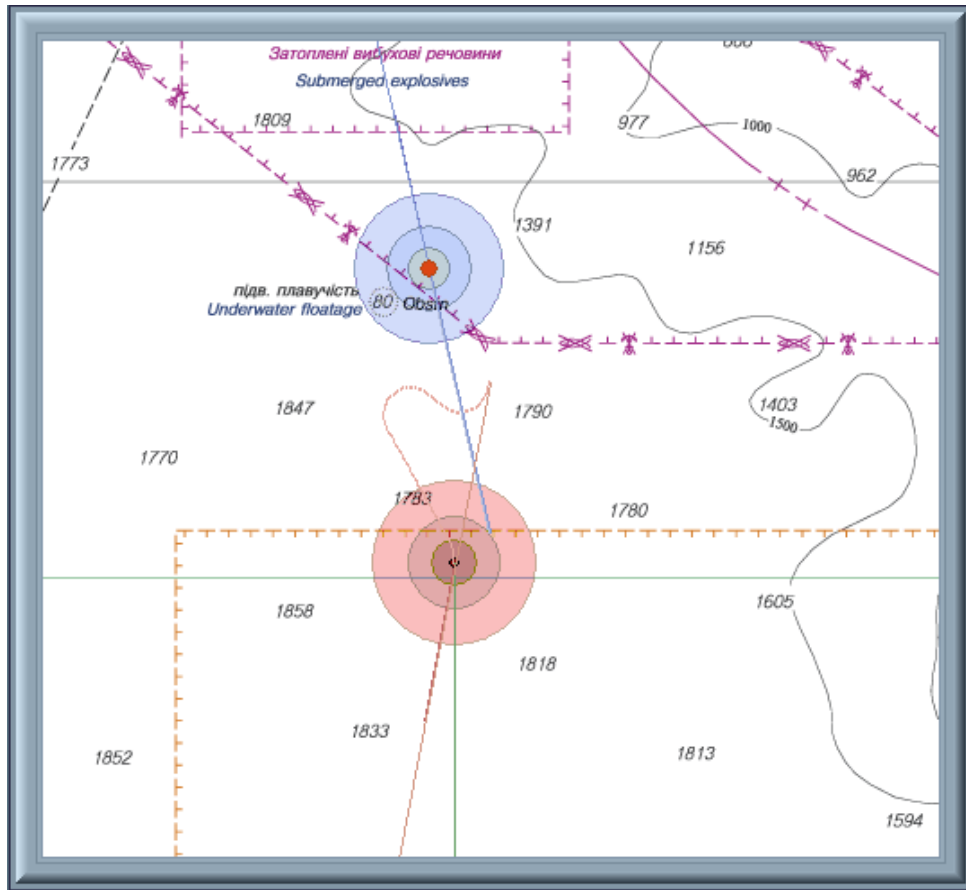


Рис. 1. Повернення судна на програмну траєкторію руху

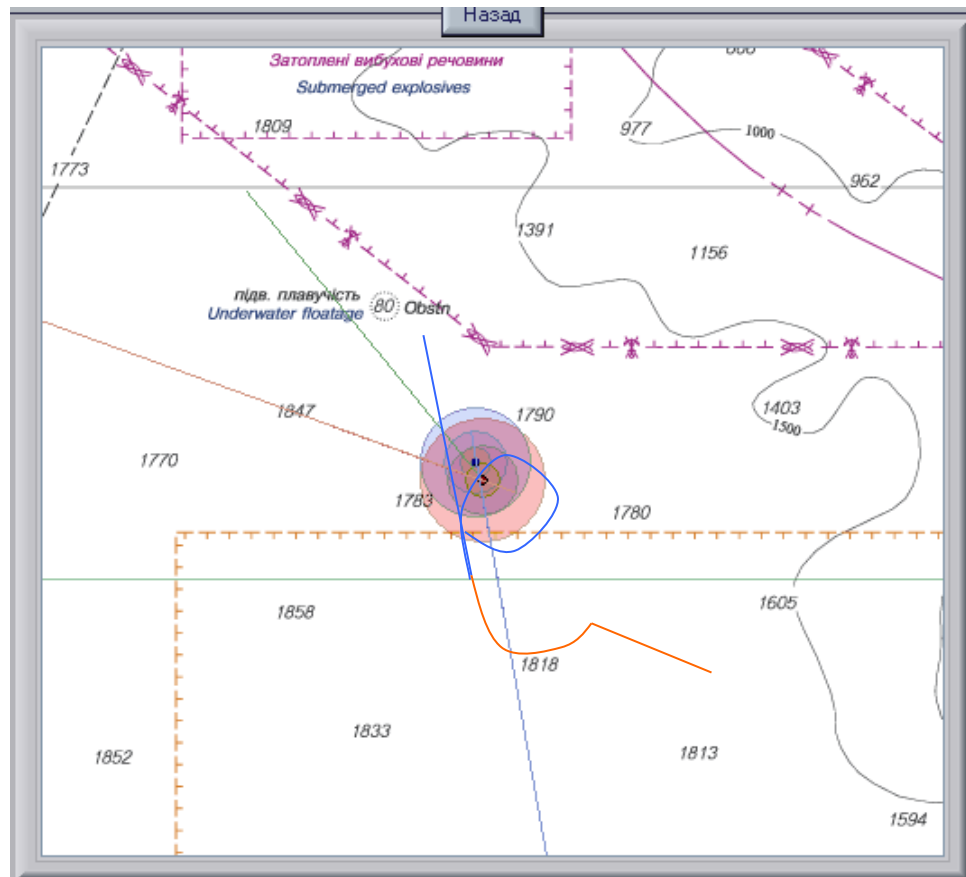


Рис. 2. Використання судном циркуляції під час розходження

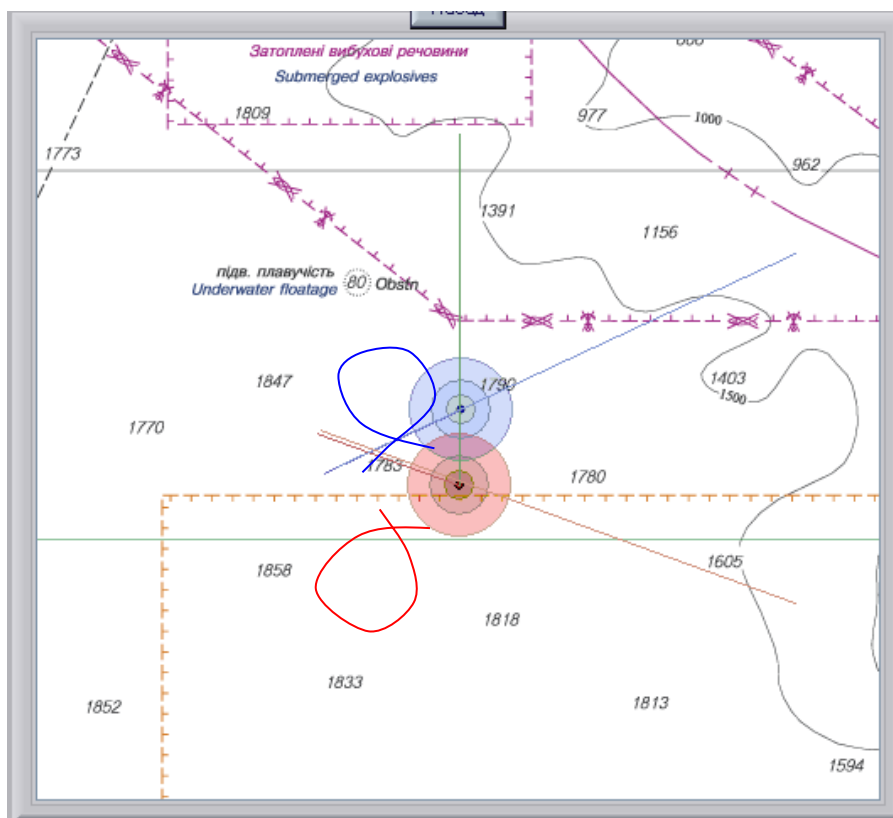


Рис. 3. Використання судами циркуляції під час розходження

Ситуація обгону, коли судно, що йде на обгін, небезпечно зближуючись, не виконує маневру ухилення, і судно, яке обганяють, змушене поступитися дорогою, здійснюючи циркуляцію вправо (рис. 4). Завершення маневру може призвести до зіткнення суден за неточного розрахунку моменту часу початку циркуляції.

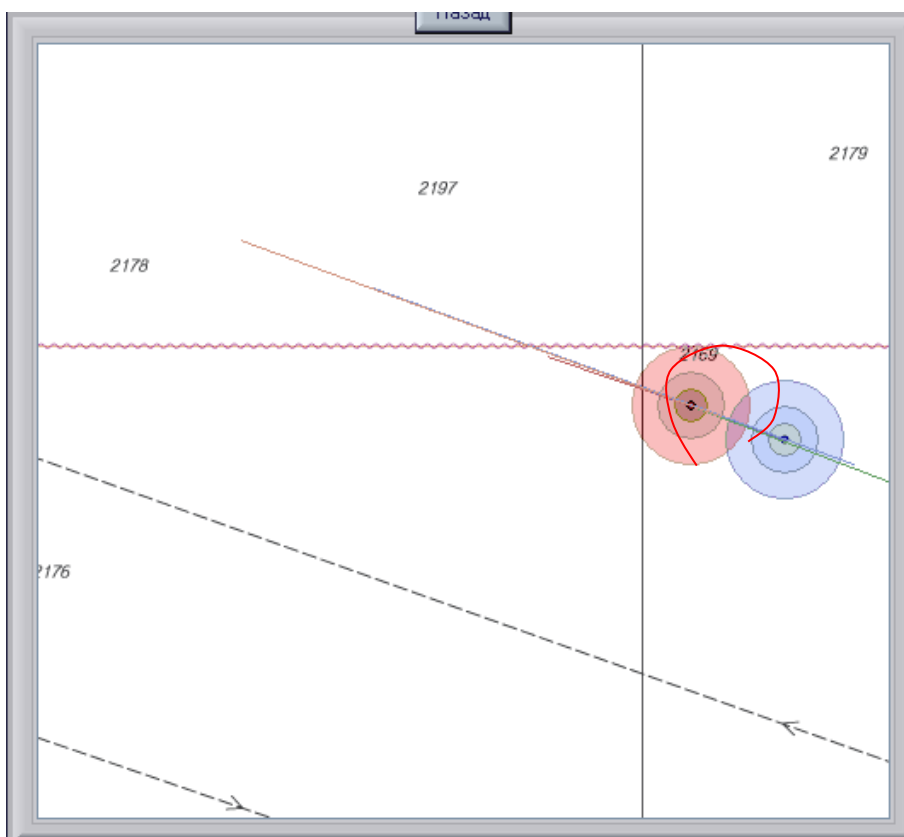


Рис. 4. Розходження суден у ситуації обгону

Таким чином, залежно від початкової позиції судна та цілі, а також від обраних ними стратегій розходження, ділянка виходу на задану траєкторію руху може реалізовуватись різними способами. Слід зазначити, що це питання має велике значення, і потребує глибшого дослідження.

### Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Запропоновано декомпозицію множини початкових позицій на підмножини, кожній з яких відповідає свій тип стратегії розходження.
2. Розглянуто різні типи траєкторій повернення судна на програмну траєкторію руху, залежно від ситуації зближення.
3. Наведено приклади типових ситуацій розходження судна з ціллю на малих відстанях.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Куликов А.М., Поддубный В.В., “Оптимальное управление расхождением судов,” *Судостроение*, № 12, с. 22-24, 1984.
2. Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е., *Гибкие стратегии расхождения судов*. Одесса: КП ОГТ, 2007.
3. Павлов В.В., Сеньшин Н.И., “Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов,” *Кибернетика и вычислительная техника*. № 68, с. 43-45, 1985.
4. Кудряшов В.Е., “Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами,” *Судостроение*, №5, с. 35-40, 1978.
5. Lisowski J., “Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation,” *Advances in Safety and Reliability*, vol. 2, pp. 1285-1292, 2005.
6. Пятаков Э.Н., Заичко С.И., “Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов,” *Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА*, вып.15, с. 166 – 171, 2008.
7. Вагущенко Л.Л., *Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути*. Одесса: Фенікс, 2013.
8. Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю., *Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения*. Херсон: Гринь Д.С., 2015.
9. Бурмака И.А., Пятаков Э.Н., Булгаков А.Ю., *Управление судами в ситуации опасного сближения*. Саарбрюккен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
10. Бурмака И.А., Булгаков А.Ю., “Маневр расхождения трех судов изменением курсов,” *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.*, вып. 20, с. 18-23, 2014.
11. Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е., “Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей,” *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р.*, с. 21–23. Миколаїв : МУК, 2017.
12. Бурмака І.О., Янчецький О. В., Федоров Д. Б., Петріченко Є. А., “Імітаційне моделювання визначення оптимальної стратегії розходження суден в ситуації їх небезпечного зближення,” *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, IX (32), Issue: 255, Jul., с. 31–34, 2021.

**REFERENCES**

1. Kulikov A.M., Poddubny V.V., “Optimalnoe upravlenie rashozhdeniem sudov,” *Sudostroenie*, № 12, pp. 22-24, 1984. [in Russian].
2. Tsymbal N.N., Burmaka I.A., Tyupikov E.E., *Gibkie strategii rashozhdeniya sudov*. Odesa: KP OGT, 2007. [in Russian].
3. Pavlov V.V., Sen`shin N.I., “Nekotorye voprosy algoritimizatsiyi vybora manevra v situatsiyah rashozhdeniya sudov,” *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. № 68, pp. 43-45, 1985. [in Russian].
4. Kudryashov V.E., “Sintez algoritmov bezopasnogo upravleniya sudnom pri rashozhdenii s neskolkimi ob`ektami,” *Sudostroenie*, №5, pp. 35-40, 1978. [in Russian].
5. Lisowski J., “Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation,” *Advances in Safety and Reliability*, vol. 2, pp. 1285-1292, 2005.
6. Pyatakov E.N., Zaichko S.I., “Ocenka effektivnosti parnykh strategiy rashodyashchih sudov,” *Sudovozhdenie: Sb. nauchn. Trudov / ONMA*, vol.15, pp. 166 – 171, 2008. [in Russian].
7. Vagushchenko L.L., *Rashozhdenie s sudami smeshcheniem na parallel`nuyu liniyu puti*. Odesa: Fenix, 2013. [in Russian].
8. Pyatakov E.N., Buzhbetsky R. Yu., Burmaka I.A., Bulgakov A.Yu., *Vzaimodeystvie sudov pri rashozhdenii dlya preduprezhdeniya stolknoveniya*. Kherson: Gryn` D.S., 2015. [in Russian].
9. Burmaka I.A., Pyatakov E.N., Bulgakov A.Yu., *Upravlenie sudami v situatsiyi opasnogo sblizheniya*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
10. Burmaka I.A., Bulgakov A.Yu., “Manevr rashozhdeniya trekh sudov izmeneniem kursov,” *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauch. – tehn. sb.*, vol. 20, pp. 18-23, 2014. [in Russian].
11. Burmaka I.A., Kulakov M.A., Kalinichenko G.E., “Opredelenie dopustimogo mnozhestva manevrov rashozhdeniya sudov izmeneniem skorostey,” *Suchasni tekhnologiyi proektuvannya, pobudovy, ekspluatatsiyi i remontu suden, mors`kykh tekhnichnykh zasobiv i inzhenernykh sporud: Materialy Vseukrayins`koyi nauk.-teh. konf., May 17-18 2017*, pp. 21–23. Mykolaiv: MUK, 2017. [in Russian].
12. Burmaka I.O., Yancetskyi O.V., Fedorov D.B., Petrichenko E.A., “Imitation design of determination of optimum strategy of divergence of ships in the situation of their dangerous rapprochement,” *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, IX (32), Issue: 255, Jul., pp. 31–34, 2021.