

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

Кваліфікаційна
наукова праця
на правах рукопису

Маменко Павло Петрович

УДК 656.61.052

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПЛАНУВАННЯ
МАРШРУТУ ТА ОПТИМАЛЬНОГО РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН В
УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані
технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



П.П. Маменко

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Зінченко Сергій Миколайович
доктор технічних наук, доцент

Херсон - 2023

АНОТАЦІЯ

Маменко П.П. - Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології. – Херсонська державна морська академія Міністерства освіти і науки України, Херсон, 2023.

За останні два роки обсяги міжнародної торгівлі коливаються під впливом ускладнень спричинених пандемією COVID19 та військовим нападом країни агресора Росія на Україну, але не зважаючи на все це морські перевезення залишаються на своїх лідерських позиціях забезпечуючи близько 90% світової торгівлі, це призводить до постійної інтенсифікації активності людини в морі. Аналізуючи інформаційні дані аварійних подій за 2002-2021 роки вітчизняних і зарубіжних джерел, а також висновки фахівців галузі щодо безпеки судноводіння і його впливу на комерційну експлуатацію судна відзначено, що основною причиною підвищеної аварійності суден є людський чинник, який є найслабшою ланкою у системі керування рухом судна.

Одним з основних аспектів безпеки судноплавства є забезпечення оптимально безпечного планування маршруту руху судна при виконанні рейсового завдання та розходження суден при плаванні по маршруту. На сьогодні основним документом що регламентує розходження суден є правила МПЗЗС-72, але, вони орієнтовані виключно на людський чинник та потребують удосконалення для використання при впровадженні на судах автоматичних систем керування. Автоматичні системи керування можуть кардинально зменшити вплив людського чинника на процеси керування, оптимізувати процеси керування та значно підвищити надійність та ефективність керування рухом судна.

Одним із пунктів основного документу, що визначає національну транспортну стратегію України як морської держави, на період до 2030 року, схваленого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р, є впровадження інтелектуальних транспортних систем та систем керування рухом на наземному та водному транспорті.

Збільшення чисельної кількості, тоннажу, швидкості, габаритів суден та інтенсивності їх руху призводить до аварій що виникли в результаті помилки контролю за рухом судна (зіткнення, навала, посадка на млину), вказують на пряму або непряму людську помилку як основну причину таких аварій, що викликає багато питань без відповіді про найкращий спосіб запобігти катастрофічним людським помилкам що призвели до аварій. У зв'язку з цим актуальною науково – технічною проблемою є розробка та практичне провадження автоматизованих систем керування із автоматичними модулями.

Розробка та практичне застосування відкритих модульних розподілених автоматизованих систем з центральним обчислювачем та розширюваними модулями автоматичного керування рухом суден отримали пріоритетне значення у сучасному суднобудуванні.

Основною вимогою до змісту виконаних у роботі досліджень є наявність **запитів практики** щодо зменшення впливу людського чинника на процеси керування, підвищення безпеки судноплавства, ефективності систем автоматизованого керування в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів, рівня автоматизації та оптимізації процесів керування рухом судна. Тому **головною ідеєю дослідження** було розробка, лабораторне тестування та впровадження автоматизованих систем підготовки судна до рейсу з автоматичними модулями планування маршруту судна, керування рухом судна при русі по маршруту та під час розходження суден з використанням полів ризиків, що дозволяло б оптимізувати спільну задачу розходження суден, підвищило ефективність автоматизованих систем та суттєво зменшило вплив людського чиннику на процеси керування.

Головне завдання дослідження структурно представлено у вирішенні чотирьох задач:

- **задача 1:** проведення комплексного аналізу сучасного стану розвитку моделей та методів підвищення безпеки судноплавства;
- **задача 2:** подальший розвиток принципів підвищення безпеки судноплавства: еталонне поле ризиків; прокладання маршруту руху судна, спільне розходження суден у полі ризиків при русі по маршруту; мінімізація ризиків для усіх учасників операції розходження;
- **задача 3:** розробка методу планування маршруту руху судна у полі ризиків: використання критерію ризику в задачі планування маршруту руху судна; оптимальні траєкторії руху судна при збереженні заданого ризику; метод градієнта у задачі планування маршруту руху судна; математичне моделювання процесів планування маршруту руху судна;
- **задача 4:** розробка методу розходження суден у полі ризиків: використання критерію ризику в задачі спільного розходження суден; оптимізація маневру розходження суден; метод градієнта у задачі розходження суден.

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного планування маршруту та оптимального розходження суден при русі по маршруту в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів, а **предметом дослідження** є принципи, методи і моделі автоматичного планування маршруту руху судна та оптимального розходження з суднами цілями при русі судна по маршруту в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів.

Наукове значення результатів дисертаційного дослідження полягає у: використанні поля ризиків для вирішення задач автоматичного планування маршруту та оптимального розходження із суднами цілями; розробці принципів, методів та засобів автоматичного планування маршруту; вирішенні задачі оптимізації траєкторії розходження, за умови не перевищення заданого ризику; врахуванні інтересів усіх учасників операції

розходження, за рахунок використання системного підходу, аналізу і синтезу, методів та інструментів проектування, моделювання та оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення, на основі розроблених принципів, методів та засобів, модулів автоматичного планування маршруту та автоматичного оптимального розходження у полі ризиків, із врахуванням інтересів усіх учасників операції, що дозволяє зменшити вплив людського чинника на процеси керування рухом судна, підвищити безпеку судноводіння, скоротити час підготовки судна до рейсу, дистанцію маршруту, час руху по маршруту та витрати палива. Розроблені принципи, методи та побудоване на їх основі алгоритмічне і програмне забезпечення модулів автоматичного керування перевірені числовим моделюванням у середовищі MATLAB та стенді імітаційного моделювання у замкненому контурі із математичною моделлю об'єкту керування. Результати математичного моделювання підтвердили працездатність та ефективність розроблених методів, що дозволяє рекомендувати їх для використання у автоматизованих системах з автоматичними модулями керування.

При цьому у роботі:

- **вперше розроблено** метод побудови поля ризику, який полягає у використанні в якості судового домену двохвимірною розподілу Гауса із середньоквадратичними значеннями невизначених факторів (похибок вимірювання положення судна та суден-цілей, часткової невизначеності характеристик судна та суден-цілей, часткової невизначеності математичних моделей судна та суден-цілей, тощо), на відміну від існуючих рішень, забезпечує планування маршруту, контроль руху судна по маршруту та розходження суден при русі по маршруту із наперед заданим ризиком зіткнення, що дозволяє підвищити безпеку судноводіння;

- **вперше розроблено** метод оптимального розходження суден у полі ризиків, який полягає в організації розходження зміною курсу руху судна шляхом ковзання по еліпсу заданого ризику, на відміну від існуючих рішень,

забезпечує можливість оптимального розходження (мінімізацію шляху розходження) із наперед заданим ризиком, що дозволяє підвищити безпеку судноводіння;

- **вперше розроблено** метод виходу на траєкторію заданого ризику та сходу із траєкторії заданого ризику при виконанні маневру розходження суден, який полягає у визначенні позиції початку маневру циркуляції, виконанні маневру циркуляції, визначенні позиції закінчення маневру розходження та виконанні маневру циркуляції для повернення на первинний курс, що надає можливість точного виходу на траєкторію розходження та повернення на первинний курс по закінченні виконання маневру розходження;

- **удосконалено** підхід до планування маршруту судна, який полягає у використанні бортового обчислювача для визначення маршруту руху судна у полі ризиків з використанням градієнтних методів, на відміну від існуючих рішень, забезпечує автоматичну прокладку маршруту руху судна з використанням новітніх технологій: цифрових морських навігаційних карт, гідрометеорологічних карт, графіків руху інших суден, повідомлень мореплавцям, тощо, що дозволяє значно скоротити час підготовки судна до рейсу, оптимізувати маршрут руху судна, зменшити витрати палива, підвищити безпеку судноплавства;

- **набули подальшого розвитку** принципи підвищення безпеки судноплавства, що полягають у плануванні маршруту, контролю руху судна по маршруту, розходженні судна при русі по маршруту із заздалегідь не запланованими суднами-цілями, на відміну від існуючих рішень, враховують інтереси усіх учасників операції розходження як на етапі планування маршруту судна, так і на етапі руху судна по маршруту, та дозволяють значно підвищити ефективність судноплавства та знизити ризики зіткнення суден.

У розділі 1 проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку моделей та методів підвищення безпеки судноплавства, приведена

статистика аварій на морському транспорті, проаналізовані причини аварій, встановлено, що людський чинник є найслабшою ланкою в автоматизованих системах керування рухом суден. На підставі вивчення та систематизації матеріалів з відкритих джерел щодо підвищення безпеки судноводіння, сформульовано завдання, вимоги та концептуальну модель АСК (автоматизована система контролю) рухом судна, визначено її структурний склад. Зазначено, що наявність e-navigation та використання сучасного навігаційного обладнання ECDIS суттєво спрощує роботи по навігаційній підготовці судна до рейсу, включаючи підбір картографічної, навігаційної, гідрографічної, довідкової та іншої інформації, попередню прокладку та перевірку маршруту руху судна. Обґрунтовано необхідність розробки методу планування маршруту руху судна, який дозволив би побудувати оптимальний маршрут при збереженні заданого ризику зіткнення; використовувати метод градієнта для задачі планування маршруту; провести математичне моделювання процесів планування маршруту руху судна у полі ризиків. Обґрунтовано необхідність розробки методу спільного розходження суден у полі ризиків при плаванні по маршруту, який дозволив би оптимізувати операції маневру розходження суден; адаптувати метод градієнта для вирішення задач розходження суден; провести математичне моделювання процесів розходження суден.

У розділі 2 розглянуто нові принципи та методи підвищення безпеки судноплавства, які можуть бути реалізовані у бортовому обчислювачі системи автоматизованого керування рухом судна. Розглянуто новий принцип підвищення безпеки судноплавства, який полягає у врахуванні, при плануванні маршруту судна, контролю руху судна по маршруту та під час розходження з іншими суднами, інтересів усіх учасників операції, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку судноплавства. При цьому, отримані умови реалізації принципу врахування інтересів усіх учасників операції, що полягають у отриманні такого оптимального рішення, яке не погіршує жодне із рішень решти учасників, тобто, компоненти

цільового вектора незалежні і їх стани не впливають один до одного. Показано, що умови врахування інтересів усіх учасників операції можуть бути реалізовані у полі ризиків. Розроблено метод побудови поля ризиків власного судна та суден цілей, який полягає у використанні у якості судового домену сумарного розподілу ризиків навколо власного судна та суден-цілей, врахуванні похибок вимірювання, обчислення, інших невизначених факторів, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку мореплавства. Розроблено метод побудови сумарного поля ризиків, який полягає у накладанні полів ризиків власного судна, суден-цілей, полів ризиків інших навігаційних небезпек, що дозволяє отримати аналітичний вираз поля ризиків, ліній рівня поля ризиків з метою візуалізації та подальшої числової обробки у бортовому обчислювачі системи автоматизованого керування рухом судна. Досліджена можливість використання градієнтних методів для роботи з полем ризиків, яка полягає у отриманні оптимальних рішень у задачах планування маршруту судна, контролю руху судна по маршруту та розходження з суднами-цілями при русі по маршруту, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку судноплавства.

У розділі 3 розглянуті питання щодо використання критерію ризику у задачі планування маршруту руху судна. Зазначено, що традиційна концепція безпеки, побудована з використанням поняття судовий домен, має істотний недолік - вона копіює ручну прокладку маршруту руху судна. Показано, що більш перспективним є перехід до судового домену, який описується законом розподілу імовірностей. Такий перехід ґрунтується на тому, що ризик є завжди і всюди і не існує області, де ризик відсутній взагалі. Розглянуті питання автоматичної прокладки маршруту руху судна у полі ризиків. Наведено алгоритм автоматичної прокладки маршруту руху судна та дано опис основних функціональних блоків. Показано, що використання поля ризиків дозволяє підтримувати зручні екранні форми для візуалізації поля операцій. Розглянуті питання використання градієнтних методів у задачі

прокладки маршруту руху судна. Зазначено, що: гладкість полів ризиків дозволяє використовувати прості градієнтні процедури для вирішення оптимізаційних задач; головною перевагою градієнтних процедур є їх простота, можливість суттєво скоротити час пошуку оптимального рішення та надійність отримання кінцевого результату. Приведені умови використання градієнтних процедур у задачах прокладки маршруту і розходження судна при русі по маршруту із однією та де – кількома небезпечними суднами-цілями чи об'єктами. Розроблено метод планування маршруту руху судна, який полягає у побудові у бортовому обчислювачі поля ризиків з використанням навігаційних електронних карт, електронних графіків руху суден, радіолокаційного і оптичного полів, визначенні параметрів руху суден цілей по даним РЛС та АІС (ЗНО), коригуванні траєкторії руху власного судна із використанням градієнтних процедур та заданого ризику зіткнення, на відміну від існуючих забезпечує автоматичне планування маршруту та оперативне відображення даних, що дозволяє автоматизувати рутині операції та скоротити час прокладання маршруту руху судна у 10 разів, скоротити загальний час підготовки до рейсу на 10%, скоротити дистанцію руху судна по маршруту та зменшити витрати палива на 7%. Проведено математичне моделювання процесів прокладки маршруту руху судна із використанням розроблених процедур та градієнтних методів.

У розділі 4 сформульована задача оптимального розходження суден у полі ризиків із врахуванням інтересів усіх учасників операції при русі судна по маршруту. Показано, що інтереси усіх учасників операції розходження у полі ризиків будуть враховані, якщо еліпси заданих ризиків власного судна і суден цілей не перетинаються. Дана умова враховується як обмеження при вирішенні задач оптимального розходження суден у полі ризиків. Розроблено метод оптимального розходження суден у полі ризиків, який, на відміну від існуючих, враховує заданий ризик зіткнення та інтереси усіх учасників операції, що дозволяє науково обґрунтувати розмір зони безпечного розходження, із врахуванням середньоквадратичних значень найбільш

суттєвих невизначеностей, зменшити, за рахунок цього, дистанцію розходження та витрати палива під час розходження на 30%, зменшити час розходження на 4%. Розроблено метод оптимального розходження судна у полі ризиків із багатьма суднами-цілями, що враховує інтереси усіх учасників операції та полягає у порівнянні існуючих можливих варіантів оптимального розходження, вибору із них такого, що має найменшу траєкторію розходження за умови не перевищення заданого ризику улюбій точці траєкторії руху судна. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення модулів автоматичного керування бортового контролеру автоматизованої системи керування рухом суден, що дозволяють реалізувати зазначені методи оптимального розходження судна з однією та багатьма суднами-цілями.

Ключові слова: безпека судноводіння, людський чинник, навігаційні ризики, інтелектуальна транспортна система, автоматизована система, оптимальне розходження, математичне моделювання, градієнтні методи.

Наукові результати дисертаційного дослідження опубліковані в наступних працях:

1. Зінченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.А. Скорочення часу чисельного інтегрування математичної моделі судна у бортовому обчислювачі. *Науковий вісник ХДМА*, 2018, №1(18), с. 171-177. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>
2. Zinchenko S.M., **Mamenco P.P.**, Grosheva O.O., Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions. *Науковий вісник ХДМА*, 2019, №2(21), с. 10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/>
3. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateychuk V.M., **Mamenco P.P.**, Grosheva O.O. Automatic Collision Avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, № 4, pp. 211-221. DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-20. (WoS). <http://ric.zntu.edu.ua/>

4. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., **Mamenko P.P.**, Popovych I.S., Grosheva O.O. Automatic collision avoidance system with multiple targets, including maneuvering ones. *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*, 2019, № 4(96), pp. 69-79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79. (WoS). <https://www.semanticscholar.org/>
5. Zinchenko S.M., Mateichuk V.M., Nosov P.S., Popovych I.S., Solovey O.S., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2020, Vol.16, №2, P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. (WoS). <https://sciendo.com/>
6. Zinchenko S.M., Ben A.P., Nosov P.S., Popovich I. S., **Mamenko P.P.**, Mateychuk V.M. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control Systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, № 2, pp. 183-195. (WoS). DOI:<https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19>.
7. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Ben A.P., Prokopchuk Y.A, **Mamenko P.P.**, Popovich I.S., Moiseienko V., Kruglyj D.G. Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2021, Vol. 2 No. 9 (110). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>. (SCOPUS).
8. **Mamenko P.P.**, Zinchenko S.N., Kobets V.M., Nosov P.S, Popovych I.S. Solution of the Problem of Optimizing Route with Using the Risk Criterion. In: *Babichev S., Lytvynenko V. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021, vol 77, p. 252-265, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_17. (SCOPUS).
9. Nosov P., Zinchenko S., Plokhikh V., Popovych I., Prokopchuk Yu., Makarchuk D., **Mamenko P.**, Moiseienko V.S, Ben A. Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies: Control processys, 2021, Vol. 4, No. 3(112), pp. 27-35. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239093. (SCOPUS).

10. **Mamenko P.** (2023). Minimization of ships' passing path in the field of risks. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(70)., pp. 21-25. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276419>

11. **Mamenko P.** (2023). Automatic planning of the ship's route in the risk field using gradient procedures and a given collision risk. *Наука і Техніка сьогодні*, 6(20)., pp. 23-37. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-23-37](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-23-37)

Патент, який захищає наукову новизну:

12. Патент на винахід №123235. МПК G05D 1/08 (2006.01), G05D 1/02 (2020.01), B63H 25/04 (2006.01). Система водіння по маршруту // Зінченко С.М., Грошева О.О., Матейчук В.М., **Маменко П.П.**, Півоваров Л.А. - Заявка А201903052, заявлено 28.03.2019, опубліковано 03.03.2021, бюл. № 9/2021.

Апробація матеріалів дисертаційного дослідження:

13. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Використання математичної платформи для оцінки курсу під час маневрування судна. Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 11-14 вересня 2019. https://ksma.ks.ua.2021/09/Матеріали_БЖД_19.pdf. с. 207-209

14. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Використання математичної моделі ЧЕ гірокомпасу для обліку інерційної девіації. Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика: міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 11-14 вересня 2019. https://ksma.ks.ua.2021/09/Матеріали_БЖД_19.pdf. с. 203-206.

15. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Use of navigations simulators for development and testing ship control systems. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S. Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 350-355.
16. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Automatic Collision Avoidance with many targets, including maneuvering ones. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V.S., Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 343-349.
17. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Надлишковість з керування як кількісний захід маневреності судна. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019): Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 28-30 травня 2019 р. https://ksma.ks.ua/2021/02/MINTT_2019.pdf. с. 97 – 99.
18. Зінченко С.М., Носов П.С., Грошева О. А., **Маменко П.П.**, Матейчук В.М. Керування судном за умов зовнішніх впливів. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019): Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 28-30 травня 2019 р. https://ksma.ks.ua/2021/02/MINTT_2019.pdf. с. 177-178.
19. Zinchenko S.M., Ben A.P. , Nosov P.S., **Mamenko P.P.** , Mateichuk V.M. Improving the accuracy and reliability of automatic vessel motion control system. Modern information and innovation technologies in transport MINTT-2020. Materials of the 12 th international scientific and practical conference. May 27-29, 2020 Kherson, pp. 54-58. https://ksma.ks.ua/MINTT_2020.pdf
20. **P.P. Mamenko**, S.M. Zinchenko, P.S. Nosov. I.S. Popovych. Solution of the task of optimizing route with using the risk criterion. Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence (ICDMCI-2021): Materials of

the International Scientific Conference, Jeleznyi Port, 24-28 May 2021. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-82014-5>. pp. 252-265

21. **P.P. Mamenko**, S.M. Zinchenko. The use of the risk criterion in the task of optimization of ship divergence trajectories. Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT - 2021): Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 25-27, 2021. https://ksma.ks.ua.2021/09/MINTT_2021.pdf. pp. 125-129.

22. **Mamenko P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., Mateichuk V.M. Minimization of navigation risk in the problem of vessel diverging. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021, p. 216, repositsc.nuczu.edu.ua.

23. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., **Mamenko P.P.** Automatic vessel steering in a storm. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

24. Moiseenko V.S., Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M. Improving the reliability of dynamic positioning in the event of shading or wind sensor failure. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

25. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Modeling the behavior of navigator to improve safety of maritime transport operation. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

26. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Complex analysis of ECDIS-DATA to increase the safety of marine transport operation. Actual problems of transport,

energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

27. **Pavlo Mamenko**, Serhii Zinchenko, Pavlo Nosov, Kostiantyn Kyrychenko, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi and Vitaliy Kobets. Research of Divergence Trajectory with a Given Risk of Ships Collisions. 2nd International workshop on computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021), Rivne, 5 November, 2021, pp. 64–67.
<https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.20>

28. Nahrybelnyi Ya.A., Prokopchuk Yu.A., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V. Analysis of the functional entropy influence on decision-making by a navigator in critical situations. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. c.101-103

29. Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenko P.P.**, Moiseenko V.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Polishchuk V.O. Use of zero movements for adjustment of redundancy structures. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. c. 196-196

30. Kyrychenko K.V., Grosheva O.O., Tovstokoryi O.M., Mateichuk V.M., Moiseenko V.S., **Mamenko P.P.** Solving the problem of minimization damage in the event of imminent collision. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. c. 112-115

31. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., **Mamenko P.P.**, Artemenko A.G. Taking into account the slamming during automatic safe sailing in a storm. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021):

Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 130-132

32. Moiseienko V.S., Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V. Position keeping experiment using loprS and dgps in rough sea. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 181-184

33. **Mamenco P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Moiseienko V.S. Solution of the problem of optimizing route with using the risk criterion. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. pp. 185-188

34. **Маменко П.П.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Кириченко К.В. Методи підвищення безпеки судноводіння. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2021): Матеріали XII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2021р. https://dinuoma.com.ua/2021/12/conf_tezy_2021.pdf. с. 59-62.

35. **P. Mamenco**, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateychuk. Gradient Method in the task of Minimization of Collision Risk. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022р., <https://2022.depas.od.ua/>, с. 310-316.

36. S. Zinchenko, **P. Mamenco**, P. Nosov, V. Mateichuk, K. Kyrychenko, O. Grosheva. Use of the Pivot Point Concept for Automatic Control of a Vessel Without Drift Angle. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 317-322.

37. V. Mateichuk, A. Ben, S. Zinchenko, **P. Mamenko**, K. Kyrychenko, L. Pivovarov. Automatic Assessment of Ship Handling Skill. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 330-335.
38. K. Kyrychenko, A. Ben, S. Zinchenko, **P. Mamenko**, V. Mateichuk. Use Hydro-Turbo-Electric Generator for "Green" Shipping. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 176-179.
39. Зінченко С.М., Товстокорий О.М., **Маменко П.П.**, Кириченко К.В., Матейчук В.М. Використання полюсу повороту для маневрування з поздовжньою швидкістю. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 54-56.
40. Grosheva O.O., Zinchenko S.M., Kyrychenko K.V., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel in the conditions of an imminent collision. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 64-66.
41. Матейчук В.М., Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Кириченко К.В. Врахування амплітудно-частотної характеристики хвильового впливу на судно під час шторму. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і

технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 83-85.

42. **P. Mamenko**, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateichuk. Automation of the exit to the ellipse of the given risk. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 144-146.

43. **P. Mamenko**, A. Ben, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateichuk. Optimization of divergence in the field of risks. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022). Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Херсонська державна морська академія, м. Херсон, 07 грудня 2022., https://ksma.ks.ua/2023/06/PSDMI_2022_1.pdf. с. 98-101.

44. Cherniavskiy V., Koretsky O., Nosov P., **Mamenko P.** Approach to creating the automated monitoring system for navigator fatigue. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2022): Матеріали XIII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2022р. <https://dinuoma.com.ua/2022/12/conf20122022.pdf/> с. 22-26.

45. **Mamenko P. P.**, Zinchenko S. M., Kyrychenko K. V., Mateichuk V. M. Optimization of route laying taking into account the level of risk. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2022): Матеріали XII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2022р. <https://dinuoma.com.ua/2022/12/conf20122022.pdf/> с. 38-41.

46. **P. Mamenko**. Using the probability of collision criterion in the task of vessels divergence. XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів і студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій», Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса 20-21 квітня 2023 р., https://ontu.edu.ua/Conference_abstract-IT-21-22-04-23.pdf. с. 30-32.

47. **Mamenco P.P.** Automatic route planning of the ship's movement taking into account the danger level function. Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT-2023): Materials of the XV International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 24-25, 2023p., https://ksma.ks.ua /2023/06/ Збірник_MINTT_2023.pdf. pp. 153-155.

Підручники та навчальні посібники

48. Зінченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.О. Планування та реалізація переходу з використанням навігаційного обладнання ходового містка: навч. посіб. Херсон: ХДМА, 2020. 164 с.

Дисертаційні дослідження проведено в наступних роботах здобувача:

Всі положення, що виносяться на захист, належать особисто здобувачу і не містять результатів, ідей або розробок, що належать співавторам, разом з якими опубліковані наукові праці.

У роботах [1-4, 7, 9, 28,40] здобувачем наведені діаграми причин аварій на морському транспорті та запропоновано проводити оцінювання сумарного ризику з використанням функції ризику.

У роботах [8, 12-13, 20-21, 27, 34, 47-48] здобувачем запропоновано методи планування маршруту руху судна, які забезпечують максимальний виграш для усіх учасників операції розходження суден у полі ризиків, наведено результати числового моделювання у замкнутому контурі «Система керування – Об'єкт керування при вирішенні задач планування маршруту та розходження у полі ризиків».

У роботах [5-6, 16, 26, 29, 33,42] здобувачем представлено поле ризику у вигляді нормального закону розподілу, що характеризується середньоквадратичними параметрами невизначеностей, пов'язаних із похибками вимірювання параметрів вектора стану судна і судна цілі, похибок виконавчих механізмів, похибок математичних моделей, похибок розрахунку, тощо, запропоновано метод оптимального розходження суден шляхом маневру зміни курсу руху, що полягає в організації руху судна по

траєкторії заданого ризику та дає можливість мінімізувати траєкторію розходження суден при заданому ризику зіткнення.

У роботах [10, 21, 22, 35] здобувачем наведено математичний вираз для функції ризику та результати математичного моделювання оптимального розходження судна при русі по маршруту з використанням еліпсів рівного ризику.

У роботах [11, 27, 43, 45, 46] здобувачем запропоновано використання критерію ризику в задачі мінімізації траєкторії розходження суден, надано алгоритм планування маршруту і розходження судна з суднами цілями у полі ризиків при русі по маршруту, орієнтований на сучасні обчислювальні системи, який оперує з полями – великими масивами даних.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається із розширеної анотації, вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел із 145 найменувань на 18 сторінках і чотирьох додатків на 15 сторінках. Повний обсяг роботи становить 179 сторінок тексту, у тому числі 126 сторінки основного тексту, 2 таблиці та 41 рисунок.

ANNOTATION

Mamenko P.P. - Methods of automating processes of route planning and optimal vessels divergence in conditions of uncertainty. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. – Kherson State Maritime Academy of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kherson, 2023.

Over the past two years, the volume of international trade has fluctuated under the influence of complications caused by the COVID-19 pandemic and the military attack of the aggressor country Russia on Ukraine, but despite all this, sea transportation remains in its leading position, providing about 90% of world trade, which leads to a constant intensification of human activity in the sea. Analyzing information data on emergency events for the years 2002-2021 from domestic and foreign sources, as well as the conclusions of industry experts regarding the safety of navigation and its impact on the commercial operation of ships, it was noted that the main reason for the increased accident rate of ships is the "human factor", which is the weakest link in the system vessel movement control.

One of the main aspects of shipping safety is the provision of optimally safe route planning when performing a voyage task and the separation of ships at sea when sailing along a route. Currently, the main document regulating the divergence of ships is the rules COLREG-72, but they are focused exclusively on the "human factor" and need improvement for use when implementing automatic control systems on ships. Automatic control systems can radically reduce the influence of the "human factor" on control processes, optimize control processes and significantly increase the reliability and efficiency of ship movement control.

One of the points of the main document defining the national transport strategy of Ukraine as a maritime state for the period until 2030, approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 30, 2018 No. 430-r, is the

implementation of intelligent transport systems and traffic control systems on land and sea transport.

An increase in the number, tonnage, speed, dimensions of ships and the intensity of their movement leads to accidents that occurred as a result of an error in controlling the movement of the ship (collision, crowding, grounding), point to direct or indirect "human error" as the main cause of such accidents that raises many unanswered questions about the best way to prevent catastrophic human error that leads to accidents. In this regard, the actual scientific and technical problem is the development and practical implementation of automated control systems with automatic modules.

The development and practical application of open modular distributed automated systems with a central computer and expandable modules for automatic control of the movement of ships have received priority in modern shipbuilding.

The main requirement for the content of the research carried out in the work is the availability of **practical requests** for reducing the influence of the human factor on control processes, increasing the safety of shipping, the effectiveness of automated control systems in conditions of uncertainty of external and internal factors, the level of automation and optimization of the processes of controlling of the ship's handling. Therefore, the main idea of the **scientific research** was the development, laboratory testing and implementation of automated systems for preparing a ship for a voyage with automatic modules for route planning and control of the ship's sailing on the route and during the divergence of ships using risk fields, which would allow optimizing the common task of divergence of ships, increased the efficiency of automated systems and significantly reduced the influence of the "human factor" on management processes..

The main task of the research is structurally presented in solving four tasks:

- **task 1:** carrying out a comprehensive analysis of the current state of development of models and methods of improving safety navigation;
- **task 2:** further development of the principles of improving safety navigation: reference field of risks; laying out the ship's route, joint divergence of

ships in the field of risks when sailing along the route; minimization of risks for all participants of the divergence operation;

- **task 3:** development of the method of planning the ship's route in the field of risks: the use of the risk criterion in the task of planning the ship's route; optimal trajectories of the ship while preserving the given risk; the gradient method in the task of planning the ship's route; mathematical modeling of ship route planning processes;

- **task 4:** development of the method of divergence of vessels in the field of risks: use of the risk criterion in the task of common divergence of vessels; optimization of the vessel divergence maneuver; the gradient method in the task of vessel divergence.

The object of the research is the process of automatic planning of the route of the ship's and the optimal divergence of ships when sailing along the route in conditions of uncertainty of external and internal factors, and **the subject of the research** are the principles, methods and models of automatic planning of the route of the ship's and optimal divergence with the vessels and targets during the sailing of the ship along the route in conditions of uncertainty of external and internal factors.

The scientific significance of the results of the dissertation research consists in: the use of the risk field to solve the tasks of automatic route planning and optimal divergence with ships and targets; development of principles, methods and means of automatic route planning; solving the task of optimizing the divergence trajectory, provided that the given risk is not exceeded; taking into account the interests of all participants in the divergence operation, due to the use of a systematic approach, analysis and synthesis, methods and tools of design, modeling and optimization.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of creating, on the basis of the developed principles, methods and tools, modules for automatic route planning and automatic optimal divergence in the field of risks, taking into account the interests of all participants in the operation, which allows

reducing the influence of the "human factor" on the processes of controlling the movement of the ship, increase the safety of navigation, reduce the time of preparation of the ship for the voyage, the distance of the route, the time of sailing along the route and fuel consumption. The developed principles, methods and the algorithmic and software of the automatic control modules built on their basis have been verified by numerical simulation in the MATLAB environment and a closed loop simulation bench with a mathematical model of the control object. The results of mathematical modeling confirmed the workability and efficiency of the developed methods, which allows recommending them for use in automated systems with automatic control modules.

At the same time, in the research:

- **for the first time**, a method of constructing a risk field was developed, which consists in using as a ship domain a two-dimensional Gaussian distribution with root mean square values of uncertain factors (measurement error of the position of the ship and targets, partial uncertainty of characteristics of the ship and target ships, partial uncertainty of mathematical models of the ship and target ships, etc.), in contrast to existing solutions, provides planning of the ship's route, control of the ship's sailing along the route and divergence of ships with a predetermined risk of collision, which allows to increase the safety of navigation;

- **for the first time**, the method of optimal divergence of ships in the field of risks, which consists in organizing divergence by changing the course of the vessel by sliding along the ellipse of a given risk, unlike existing solutions, provides the possibility of optimal divergence (minimization of the path of separation) with a predetermined risk, which allows increasing the safety of navigation;

- **for the first time**, the method of entering the trajectory of the given risk and leaving the trajectory of the given risk when performing the maneuver of the divergence of vessels, which consists in determining the position of the start of the circulation maneuver, performing the circulation maneuver, determining the position of the end of the divergence maneuver, and performing the circulation

maneuver to return to the original course, which provides the possibility of accurate entering the divergence trajectory and returning to the primary course after completing the divergence maneuver;

- **improved** the approach to planning the ship's route, which consists in using an on-board computer to determine the ship's route in the field of risks using gradient methods, unlike existing solutions, provides automatic laying of the ship's route using the latest technologies: digital marine navigation charts, hydrometeorological charts, traffic schedules of other ships, notice to mariners, etc., which allows to significantly reduce the time of preparation of the ship for the voyage, optimize the route of the ship, reduce fuel consumption and improve the safety of navigation

- **have gained further development** the principles of improving safety of navigation, which consist in planning the route of the ship, controlling the sailing of the ship along the route, the diverging of the ship when passing along the route with unplanned targets, unlike the existing solutions, take into account the interests of all participants in the divergence operation as at the stage of planning the route of the ship, as well as at the stage of the ship's movement along the route, and allow to significantly increase the efficiency of navigation and reduce the risks of ship collisions.

In Chapter 1, a comprehensive analysis of the current state of development of models and methods of improving safety of navigation is carried out, statistics of accidents on sea transport are given, the causes of accidents are analyzed, it is established that the "human factor" is the weakest link in automated ship traffic control systems. On the basis of the study and systematization of materials from open sources on improving the safety of navigation, the tasks, requirements and conceptual model of the ACS (automatic control system) of the ship's movement were formulated, and its structural composition was determined. It is noted that the availability of e-navigation and the use of modern ECDIS navigation equipment significantly simplifies the work on navigational preparation of the ship for the voyage, including the selection of cartographic, navigational, hydrographic,

reference and other information, preliminary laying and checking of the route. The need to develop a method for planning the ship's route is substantiated, which would allow building an optimal route while preserving the given risk of collision; use the gradient method for the task of planning the ship's route; to carry out mathematical modeling of the processes of planning the ship's route in the field of risks. The need to develop a method of joint divergence of ships in the field of risks when sailing along the route, which would allow optimizing operations of the maneuver of the divergence of ships, is substantiated; to adapt the gradient method for solving the tasks of the ships divergence; to carry out mathematical modeling of the processes of ships divergence.

In Chapter 2, discusses new principles and methods of improving safety of navigation that can be implemented in the on-board computer of the automated vessel traffic control system. A new principle of increasing the safety of navigation is considered, which consists in taking into account the interests of all participants in the operation when planning the ship's route, controlling the ship's sailing along the route and during divergence with other ships, which allows to reduce the risks of collision and increase the safety of navigation. At the same time, the conditions for realizing the principle of taking into account the interests of all participants in the operation are obtained, which consist in obtaining such an optimal solution that does not worsen any of the decisions of the remaining participants, i.e., the components of the target vector are independent and their states do not affect each other. It is shown that the conditions for taking into account the interests of all participants in the operation can be implemented in the field of risks. A method of constructing the risk field of one's own ship and target ships has been developed, which consists in using as a ship domain the total distribution of risks around one's own ship and target ships, taking into account errors of measurement, calculation, and other uncertain factors, which allows to reduce the risks of collision and increase the safety of navigation. A method of constructing a total risk field has been developed, which consists in superimposing the risk fields of one's own vessel, target vessels, risk fields of other navigational hazards, which allows to

obtain an analytical expression of the risk field, lines of the level of the risk field for the purpose of visualization and further numerical processing in the on-board computer of the automated control system by the ship's handling. The possibility of using gradient methods for operating with the field of risks has been researched, which consists in obtaining optimal solutions in the tasks of planning the ship's route, controlling the sailing of the ship along the route and diverging with the targets while passing along the route, which allows to reduce the risks of collision and increase the safety of navigation.

In Chapter 3, deals with the use of the risk criterion in the ship's route planning task. It is noted that the traditional concept of security, built using the concept of the ship domain, has a significant drawback - it copies the manual preparation of the ship's route. It is shown that the transition to the ship domain, which is described by the law of probability distribution, is more promising. Such a transition is based on the fact that risk is always and everywhere and there is no area where there is no risk at all. Issues of automatic ship's route planning in the field of risks are considered. The algorithm of automatic ship's route laying is given and the description of the main functional blocks is given. It is shown that the use of the field of risks allows maintaining convenient screen forms for visualization of the field of operations. The issues of the use of gradient methods in the task of laying a ship's route are considered. It is noted that: the smoothness of risk fields allows the use of simple gradient procedures for solving optimization tasks; the main advantage of gradient procedures is their simplicity, the ability to significantly reduce the time of searching for an optimal solution, and the reliability of obtaining the final result. The conditions for using gradient procedures in the tasks of ship's route planning and divergence with one and where there are several dangerous targets are given. A method of ship's route planning has been developed, which consists in building a risk field in the on-board calculator using electronic navigational charts, electronic graphs of vessel movements, radar and optical fields, determining the parameters of target movement based on radar and AIS (AtoN) data, adjusting the trajectory of one's

own vessel using gradient procedures and a given risk collision, unlike the existing ones, provides automatic ship's route planning and operational data display, which allows you to automate routine operations and reduce the time of ship's route planning by 10 times, reduce the total time of preparation for the voyage by 10%, reduce the length of the route and reduce fuel consumption by 7%. Mathematical modeling of ship's route laying processes was carried out using the developed procedures and gradient methods.

In Chapter 4 formulated the task of optimal divergence of ships in the field of risks, taking into account the interests of all participants in the operation when the ship sailing along the route. It is shown that the interests of all participants in the operation of divergence in the field of risks will be taken into account if the ellipses of the given risks of the own ship and the target ships do not intersect. This condition is taken into account as a limitation when solving tasks of optimal divergence of ships in the field of risks.

The method of optimal divergence in the field of risks has been developed, which, unlike the existing ones, takes into account the given risk of collision and the interests of all participants in the operation, which allows to scientifically substantiate the size of the zone of safe ships divergence, taking into account the root mean square values of the most significant uncertainties, to reduce, due to this, the distance of divergence and fuel consumption during divergence by 30%, reduce divergence time by 4%. The method of optimal divergence in the field of risks with many target vessels has been developed, which takes into account the interests of all participants in the operation and consists in comparing the existing possible options for optimal divergence, choosing from them the one that has the smallest trajectory of divergence, provided that the given risk is not exceeded at any point of the trajectory. Algorithmic and software for the automatic control modules of the on-board controller of the automated vessel traffic control system were developed, allowing to implement the specified methods of optimal divergence with one and many target vessels.

Key words: Key words: safety of navigation, human factor, navigation

risks, intelligent vehicles, automated system, optimal divergence, mathematical modeling, sliding on the given risk ellipse, gradient methods.

The scientific results of the dissertation research were published in the following works:

1. Зінченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.А. Скорочення часу чисельного інтегрування математичної моделі судна у бортовому обчислювачі. *Науковий вісник ХДМА*, 2018, №1(18), с. 171-177. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>
2. Zinchenko S.M., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O., Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions. *Науковий вісник ХДМА*, 2019, №2(21), с. 10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015.
3. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateychuk V.M., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O. Automatic Collision Avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, № 4, pp. 211-221. DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-20. (WoS).
4. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., **Mamenko P.P.**, Popovych I.S., Grosheva O.O. Automatic collision avoidance system with multiple targets, including maneuvering ones. *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*, 2019, № 4(96), pp. 69-79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79. (WoS).
5. Zinchenko S.M., Mateichuk V.M., Nosov P.S., Popovych I.S., Solovey O.S., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2020, Vol.16, №2, P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. (WoS).
6. Zinchenko S.M., Ben A.P., Nosov P.S., Popovich I. S., **Mamenko P.P.**, Mateychuk V.M. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control Systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, № 2, pp. 183-195. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19>. (WoS).
7. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Ben A.P., Prokopchuk Y.A, **Mamenko P.P.**, Popovich I.S., Moiseienko V., Kruglyj D.G. Navigation safety control system

development through navigator action prediction by data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2021, Vol. 2 No. 9 (110). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237> (SCOPUS).

8. **Mamenco P.P.**, Zinchenko S.N., Kobets V.M., Nosov P.S, Popovych I.S. Solution of the Problem of Optimizing Route with Using the Risk Criterion. *In: Babichev S., Lytvynenko V. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021, vol 77, p. 252-265, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_17. (SCOPUS).

9. Nosov P., Zinchenko S., Plokhikh V., Popovych I., Prokopchuk Yu., Makarchuk D., **Mamenco P.**, Moiseienko V.S, Ben A. Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Control processys*, 2021, Vol. 4, No. 3(112), pp. 27-35. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239093. (SCOPUS).

10. **Mamenco P.** (2023). Minimization of ships' passing path in the field of risks. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(70)., pp. 21-25. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276419>

11. **Mamenco P.** (2023). Automatic planning of the ship's route in the risk field using gradient procedures and a given collision risk. *Наука і Техніка сьогодні*, 6(20)., pp. 23-37. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-23-37](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-23-37)

A patent that protects scientific innovation:

12. Патент на винахід №123235. МПК G05D 1/08 (2006.01), G05D 1/02 (2020.01), B63H 25/04 (2006.01). Система водіння по маршруту // Зінченко С.М., Грошева О.О., Матейчук В.М., **Маменко П.П.**, Півоваров Л.А. - Заявка А201903052, заявлено 28.03.2019, опубліковано 03.03.2021, бюл. № 9/2021.

Approbation of dissertation research materials:

13. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Використання математичної платформи для оцінки курсу під час маневрування судна. Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 11-14 вересня 2019. https://ksma.ks.ua.2021/09/Матеріали_БЖД_19.pdf. с. 207-209
14. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Використання математичної моделі ЧЕ гірокомпасу для обліку інерційної девіації. Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика: міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 11-14 вересня 2019. https://ksma.ks.ua.2021/09/Матеріали_БЖД_19.pdf. с. 203-206.
15. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Use of navigations simulators for development and testing ship control systems. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S. Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 350-355.
16. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Automatic Collision Avoidance with many targets, including maneuvering ones. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V.S., Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 343-349.
17. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Надлишковість з керування як кількісний захід маневреності судна. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019): Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 28-30 травня 2019 р. https://ksma.ks.ua/2021/02/MINTT_2019.pdf. с. 97 – 99.

18. Зінченко С.М., Носов П.С., Грошева О. А., **Маменко П.П.**, Матейчук В.М. Керування судном за умов зовнішніх впливів. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019): Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 28-30 травня 2019 р. https://ksma.ks.ua/2021/02/MINTT_2019.pdf. с. 177-178.
19. Zinchenko S.M., Ben A.P. , Nosov P.S., **Mamenco P.P.** , Mateichuk V.M. Improving the accuracy and reliability of automatic vessel motion control system. Modern information and innovation technologies in transport MINTT-2020. Materials of the 12 th international scientific and practical conference. May 27-29, 2020 Kherson, pp. 54-58. https://ksma.ks.ua/MINTT_2020.pdf
20. **P.P. Mamenco**, S.M. Zinchenko, P.S. Nosov. I.S. Popovych. Solution of the task of optimizing route with using the risk criterion. Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence (ICDMCI-2021): Materials of the International Scientific Conference, Jelezny Port, 24-28 May 2021. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-82014-5>. pp. 252-265
21. **P.P. Mamenco**, S.M. Zinchenko. The use of the risk criterion in the task of optimization of ship divergence trajectories. Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT - 2021): Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 25-27, 2021. https://ksma.ks.ua/2021/09/MINTT_2021.pdf. pp. 125-129.
22. **Mamenco P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., Mateichuk V.M. Minimization of navigation risk in the problem of vessel diverging. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021, p. 216, repositsc.nuczu.edu.ua.
23. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., **Mamenco P.P.** Automatic vessel steering in a storm. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

24. Moiseenko V.S., Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M. Improving the reliability of dynamic positioning in the event of shading or wind sensor failure. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.
25. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Modeling the behavior of navigator to improve safety of maritime transport operation. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.
26. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Complex analysis of ECDIS-DATA to increase the safety of marine transport operation. Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.
27. **Pavlo Mamenco**, Serhii Zinchenko, Pavlo Nosov, Kostiantyn Kyrychenko, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi and Vitaliy Kobets. Research of Divergence Trajectory with a Given Risk of Ships Collisions. 2nd International workshop on computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021), Rivne, 5 November, 2021, pp. 64–67.
<https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.20>
28. Nahrybelnyi Ya.A., Prokopchuk Yu.A., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V. Analysis of the functional entropy influence on decision-making by a navigator in critical situations. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>.
[c.101-103](#)
29. Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenco P.P.**, Moiseenko V.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Polishchuk V.O. Use of zero movements for adjustment of redundancy structures. Проблеми сталого розвитку морської

галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 196-196

30. Kyrychenko K.V., Grosheva O.O., Tovstokoryi O.M., Mateichuk V.M., Moiseenko V.S., **Mamenco P.P.** Solving the problem of minimization damage in the event of imminent collision. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 112-115

31. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., **Mamenco P.P.**, Artemenko A.G. Taking into account the slamming during automatic safe sailing in a storm. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 130-132

32. Moiseienko V.S., Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V. Position keeping experiment using lopr and dgps in rough sea. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. с. 181-184

33. **Mamenco P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Moiseienko V.S. Solution of the problem of optimizing route with using the risk criterion. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): Матеріали 1 міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 03-05 листопада 2021р. <https://ksma.ks.ua/2021/11/PSDMI-2021.pdf>. pp. 185-188

34. **Маменко П.П.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Кириченко К.В. Методи підвищення безпеки судноводіння. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2021): Матеріали XII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2021р. https://dinuoma.com.ua/2021/12/conf_tezy_2021.pdf. с. 59-62.

35. **P. Mamenko**, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateychuk. Gradient Method in the task of Minimization of Collision Risk. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022р., <https://2022.depas.od.ua/>, с. 310-316.
36. S. Zinchenko, **P. Mamenko**, P. Nosov, V. Mateichuk, K. Kyrychenko, O. Grosheva. Use of the Pivot Point Concept for Automatic Control of a Vessel Without Drift Angle. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 317-322.
37. V. Mateichuk, A. Ben, S. Zinchenko, **P. Mamenko**, K. Kyrychenko, L. Pivovarov. Automatic Assessment of Ship Handling Skill. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 330-335.
38. K. Kyrychenko, A. Ben, S. Zinchenko, **P. Mamenko**, V. Mateichuk. Use Hydro-Turbo-Electric Generator for "Green" Shipping. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2022), м. Одеса, 21 квітня 2022 р., <https://2022.depas.od.ua/> с. 176-179.
39. Зінченко С.М., Товстокорий О.М., **Маменко П.П.**, Кириченко К.В., Матейчук В.М. Використання полюсу повороту для маневрування з поздовжньою швидкістю. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 54-56.
40. Grosheva O.O., Zinchenko S.M., Kyrychenko K.V., **Mamenko P.P.**, Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel in the conditions of an imminent

collision. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 64-66.

41. Матейчук В.М., Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Кириченко К.В. Врахування амплітудно-частотної характеристики хвильового впливу на судно під час шторму. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 83-85.

42. **P. Mamenko**, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateichuk. Automation of the exit to the ellipse of the given risk. « Інформаційні технології і автоматизація – 2022 ». Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса, 20 – 21 жовтня 2022., <https://ontu.edu.ua.ITIA-2022.pdf> с. 144-146.

43. **P. Mamenko**, A. Ben, S. Zinchenko, P. Nosov, K. Kyrychenko, V. Mateichuk. Optimization of divergence in the field of risks. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022). Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Херсонська державна морська академія, м. Херсон, 07 грудня 2022., https://ksma.ks.ua/2023/06/PSDMI_2022_1.pdf. с. 98-101.

44. Cherniavskiy V., Koretsky O., Nosov P., **Mamenko P.** Approach to creating the automated monitoring system for navigator fatigue. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2022): Матеріали XIII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2022р. <https://dinuoma.com.ua/2022/12/conf20122022.pdf/> с. 22-26.

45. **Mamenko P. P.**, Zinchenko S. M., Kyrychenko K. V., Mateichuk V. M. Optimization of route laying taking into account the level of risk. Сучасні підходи

до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2022): Матеріали XII науково-практичної конференції, Ізмаїл, 9-10 грудня 2022р. <https://dinuoma.com.ua/2022/12/conf20122022.pdf/> с. 38-41.

46. **Р. Маменко**. Using the probability of collision criterion in the task of vessels divergence. XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів і студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій», Одеський національний технологічний університет Інститут комп'ютерних систем і технологій "Індустрія 4.0" ім. П.Н. Платонова., м. Одеса 20-21 квітня 2023 р., https://ontu.edu.ua/Conference_abstract-IT-21-22-04-23.pdf. с. 30-32.

47. **Маменко Р.Р.** Automatic route planning of the ship's movement taking into account the danger level function. Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT-2023): Materials of the XV International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 24-25, 2023р., https://ksma.ks.ua/2023/06/Збірник_MINTT_2023.pdf. pp. 153-155.

Textbooks and training aids

48. Зінченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.О. Планування та реалізація переходу з використанням навігаційного обладнання ходового містка: навч. посіб. Херсон: ХДМА, 2020. 164 с.

Dissertation studies were carried out in the following works of the recipient:

All provisions submitted for protection belong to the acquirer personally and do not contain results, ideas or developments belonging to the co-authors with whom the scientific works were published.

In works [1-4, 7, 9, 28,40], the acquirer provided diagrams of the causes of accidents on the sea transport and proposed to evaluate the total risk using the risk function.

In works [8, 12-13, 20-21, 27, 34, 47-48], the applicant proposed methods of ship's route planning that ensure maximum profit for all participants in the

operation of divergence in the field of risks, the results of numerical modeling in a closed circuit "Control system - Control object in solving tasks of ship's route planning and divergence in the field of risks are given ".

In works [5-6, 16, 26, 29, 33,42], the acquirer presents the risk field in the form of a normal distribution law, characterized by root mean square parameters of uncertainties associated with measurement errors of the ship and target state vector parameters, errors of executive mechanisms, errors of mathematical models, calculation errors .

In works [10, 21, 22, 35], the acquirer gives a mathematical expression for the risk function and the results of mathematical modeling of the optimal divergence of vessels using ellipses of equal risk.

In works [11, 27, 43, 45, 46], the acquirer proposed the use of the risk criterion in the task of minimizing the trajectory of the ships divergence, provided an algorithm for planning the ship's route and the divergence of the ship with the target ships in the field of risks when sailing along the route, oriented to modern computer systems, which operates with fields - large arrays of data.

Scope and structure of work. The dissertation consists of an extended annotation, an introduction, 4th chapters, conclusions, a list of used sources with 145 names on 18 pages and four appendices on 15 pages. The full volume of the work is 179 pages of text, including 126 pages of the main text, 2 tables and 41 figures.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	41
ВСТУП.....	43
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА.....	53
1.1. Аналіз причин аварій на морському транспорті.....	53
1.2. Сучасні системи та методи підвищення безпеки судноводіння.....	57
1.3. Методи планування маршруту руху судна при підготовці судна до виконання рейсового завдання.....	65
1.4. Моделі та методи розходження суден.....	69
1.5. Висновки по розділу 1.....	81
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ.....	84
2.1. Теоретичні основи спільного розходження суден в умовах невизначеності.....	85
2.2. Теоретичні основи планування маршруту із врахуванням інтересів усіх учасників операції в умовах невизначеності.....	89
2.3. Функція рівня небезпеки	95
2.4. Еталон функції рівня небезпеки	95
2.5. Висновки по розділу 2.....	101
РОЗДІЛ 3. ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ РУХУ СУДНА З УРАХУВАННЯМ ФУНКЦІЇ РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ.....	103
3.1. Використання функції рівня небезпеки у задачі планування маршруту руху судна.....	104
3.2 Автоматична прокладка маршруту руху судна з урахуванням функції рівня небезпеки.....	105
3.3 Метод градієнта в задачі планування маршруту руху судна.....	113

3.4. Математичне моделювання задачі планування маршруту руха судна.....	116
3.5. Висновки по розділу 3.....	121
РОЗДІЛ 4. РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ.....	123
4.1. Використання критерію вірогідність зіткнення в задачі розходження суден.....	124
4.2. Оптимальне розходження з однією ціллю з урахуванням рівня небезпеки.....	127
4.3. Оптимальне розходження з багатьма цілями з урахуванням рівня небезпеки.....	135
4.4. Математичне моделювання процесів розходження суден.....	138
4.5. Висновки по розділу 4.....	143
ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147
ДОДАТКИ.....	165
Додаток А. Техналогічна карта наукового дослідження.....	165
Додаток Б. Лістинги основних програм	166
Додаток В. Патент, який захищає наукову новизну.....	174
Додаток Г. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	176

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) - засоби автоматичної радіолокаційної прокладки;

COVID 19 («COronaVirus Disease», «CO» означає «корона» (corona), «VI» — «вірус») – захворювання викликане інфекцією;

CPA (Closest Point Approach) – найкоротша точка зближення;

CPG - кооперативна позиційна гра;

DO - динамічна оптимізація;

DP (Dynamic positioning) – Динамічне позиціонування, керована комп'ютером система для автоматичної підтримки позиції та курсу судна за допомогою власних гвинтів і двигунів;

ECDIS (Electronic Chart Display & Information System) – навігаційно-інформаційна комп'ютерна система;

EMSA (European Maritime Safety Agency) – Європейська Агенція з безпеки на морі;

E-NAVIGATION – електронна навігація;

GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System) – Глобальна морська система зв'язку і порятунку на морі;

GPS (Global Positioning System) – Система глобального позиціонування;

IBS / INS – інтегровані системи ходового містка / інтегровані навігаційні системи;

LRIT (Long Range Identification and Tracking of ships) – системи ідентифікації суден та стеження за ними на великій відстані;

MAIB (Marine Accident Investigation Branch) – відділ розслідування морських аварій;

MSC (The Maritime Safety Committee) – організація, що займається всіма питаннями, пов'язаними з морською безпекою та безпекою на морі, які підпадають під сферу дії ММО, охоплюючи як пасажирські судна, так і всі види вантажних суден;

NMG – не кооперативна матрична гра;

NPG (NO-Playing Game) – не кооперативна позиційна гра;

Q-навчання (Q-learning) – алгоритм безмодельного навчання з підкріпленням.

SENC (System Electronic Navigational Chart) - системна електронна навігаційна карта, що відображається в ECDIS;

SOLAS-74 (The International Convention for the Safety of Life at Sea) - Міжнародна конвенція про охорону життя людини на морі 1974 року;

ТСРА – час до найближчої точки зближення;

VTS – служба руху суден;

AIS – Автоматична Ідентифікаційна Система;

АСК – Автоматизована Система Керування;

АСППР – Автоматизована Система Підтримки Прийняття Рішень;

БО – Бортовий Обчислювач;

ГСК - Географічна Система Координат;

ЄС – Європейський Союз;

ЗАРП – Засоби Автоматичної Радіолокаційної Прокладки;

ЗСК – Зв'язана Система Координат;

КО - кінематична оптимізація.

ММО (ІМО) – Міжнародна морська організація (International Maritime Organization);

МПЗЗС-72 – Міжнародні Правила Запобігання Зіткнення Суден;

ОЛВР – Очікувана Лінія Відносного Руху;

ООН – Організація Об'єднаних Націй;

ПДМНВ-78/95 – Міжнародна конвенція про підготовку та дипломування моряків та несення вахти;

ПІД – Пропорційно Інтегрально Диференційний регулятор;

РЛС – Радіо Локаційна Станція;

СНК – Сектор Небезпечних Курсів;

УКХ – Ультра Короткі Хвилі.

ВСТУП

Ресурси і транспортні можливості Світового океану мають вирішальне значення для прискореного розвитку світової економіки, є найважливішим фактором геополітики морських держав. Україна, як морська держава, бере участь у вивченні, освоєнні і використанні ресурсів Світового океану, що потребує визначення і законодавчого закріплення національних інтересів у цій сфері діяльності, встановлення пріоритетів їх реалізації.

Перспектива розвитку транспортної галузі України визначається наступними основними документами: національною транспортною Стратегією України на період до 2030 року, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. [1], концепцією реформування транспортного сектору економіки [2], угодою про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами – членами, з іншої сторони [3], Морською доктриною на період до 2035 року, затвердженою постановою КМУ від 07.10.2009 № 1307 (із змінами, внесеними згідно з постановою КМУ від 18.12.2018 № 1108) [4]. Розвиток світової економіки збільшує обсяг морських транспортних операцій. Питання безпеки судноплавства стає визначальним при проектуванні і експлуатації суден [1-37]. У Морській доктрині України наведено інформацію щодо сучасного стану сфери морської діяльності, зокрема зазначено, що, Україна повинна дотримуватися міжнародних стандартів безпеки мореплавства та охорони суден і портів. Імплементация міжнародно-правових норм вимагає наявності чітко структурованої системи забезпечення безпеки мореплавства і охорони суден та портових засобів, впровадження належних організаційних, кадрових та матеріальних ресурсів і сучасну нормативно - правову базу. Удосконалення нормативно-правової бази означає усунення колізій у законодавстві, вжиття дієвих заходів для зміцнення зв'язків між суб'єктами системи управління морською діяльністю. Морською доктриною також

визначено один із пріоритетних напрямків розвитку – безпека морського судноплавства через: забезпечення у територіальному морі та внутрішніх морських водах режиму судноплавства, що встановлений Конвенцією ООН по морському праву та іншими міжнародними документами; охорону людського життя на морі і рятування людей, майна та суден; запобігання забрудненню морського середовища та проведення ефективного екологічного моніторингу; досягнення та підтримання у довготривалій перспективі належноекоекологічного стану морського природного середовища у територіальних водах та у морській економічній зоні України, відповідно до вимог Рамкової Директиви ЄС про Морську Стратегію; забезпечення контролю за функціонуванням життєво важливих морських комунікацій; підготовку та перепідготовку моряків, науковців та інших фахівців, зайнятих морською діяльністю.

У іншому документі, національній транспортній стратегії України на період до 2030 року говориться про необхідність впровадження інтелектуальних транспортних систем та систем керування рухом на наземному та водному транспорті. Це пов'язано із тим, що найбільша кількість аварій та катастроф на транспорті відбувається по причині «людського чинника». «Людський чинник» на сьогодні є найслабшою ланкою у системі керування рухом. Зменшення його впливу можна досягти лише через автоматизацію процесів керування. Так, усі сучасні судна оснащені автоматизованими модулями ECDIS та ARPA, які суттєво полегшують роботу судноводія. Проте, ці модулі залишаються автоматизованими, а значить передбачають наявність людини - оператора у контурі керування. У таких системах судноводій, як і раніше, приймає усі необхідні рішення по керуванню судном. Більш просунутими у плані автоматизації процесів керування є системи динамічного позиціонування (DP-systems), які використовуються на військових, пасажирських суднах, суднах постачання нафтових та газових платформ, трубоукладачах, кабелеукладачах та інших суднах, до систем керування якими висуваються

підвищені вимоги щодо ефективності керування (надійності, маневреності, точності, економічності, екологічності, тощо). Системи динамічного позиціонування здатні підтримувати задану позицію, переміщувати судна з використанням полюсу повороту та виконувати де-які інші вузькоспеціалізовані функції у автоматичному режимі. Вплив «людського чиннику» у таких системах менший, але все ж таки ще достатньо суттєвий.

Питанням розробки автоматизованих систем керування присвячені роботи Л.Л. Вагущенка, М.М. Цимбала, А.С. Мальцева, А.С. Васькова, Е.І. Веремія, В.А. Логиновського, Ю.О. Лукомського, А.А. Мироненка, А.І. Родіонова, А.Е. Сазонова, Д.А. Скороходова, С.В. Смоленцева, А. Aguiar, К.І. Äström, Т.І. Fossen, К. Hasegawa, А. Pascoal, Т. Perez, А.І. Sorensen та ін. Питанням розходження суден присв'ячені роботи О. Д. Піпченко, С.В. Смоленцева, С.М. Зінченка, Н. Shen, L. Yishan, Y. Huang, Т.А. Johansen, М. Blaich, Є.В. Калініченко та ін. Використання ергатичних систем для зменшення впливу людського фактору на процеси керування досліджувалися у роботах П.С. Носова, а дослідженням впливу людського фактору на результати професійної діяльності в окремих професійних групах, включаючи судноводіїв, присв'ячені роботи І. Поповича, О. Блінової, Р. Шевченко, І. Борисюк, Л. Федорук та ін.

У роботі [5], для підвищення ефективності автоматизованих систем керування, суттєвого зменшення їх вартості та впливу «людського чиннику» на процеси керування, запропоновано використовувати відкриті модульні розподілені автоматизовані системи з бортовим обчислювачем та розширюваними автоматичними модулями керування. На думку автора, відкритість автоматизованих систем дозволить суттєво зменшити їх вартість, а використання розширюваних автоматичних модулів керування – суттєво зменшити вплив людського чиннику на процеси керування. У таких системах судноводій лише приймає рішення про використання функціонального модулю автоматичного керування та спостерігає за його роботою. Прикладом

автоматичного модуля керування рухом, що використовується на усіх судах з початку ХХ сторіччя, є автопілот, призначений для підтримування заданого курсу та траєкторії руху судна. Наявність обчислювальної техніки та її потужностей є необхідними умовами для розробки використання автоматичних модулів у бортовому обчислювачі автоматизованих систем керування рухом суден для вирішення більш складних задач. Саме використання розширюваних автоматичних модулів керування у автоматизованих системах є найбільш перспективним напрямком розвитку автоматизованих систем на найближчі 10-20 років, до появи повністю роботизованих систем.

Керуючись вимогами національної транспортної Стратегії України на період до 2030 року [1], Морської доктрини України на період до 2035 року [4], враховуючи найбільш перспективний напрямок розвитку автоматизованих систем шляхом використання розширюваних автоматичних модулів керування рухом [5] та наявність обчислювальних потужностей сучасних бортових обчислювачів, розробка математичного забезпечення розширюваних модулів автоматичного опрацювання інформації при підготовці судна до рейсу та під час виконання рейсу є актуальною науково – технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Зміст та основні задачі дисертаційної роботи відповідають головним вимогам що пов'язані із національною транспортною стратегією України на період до 2030 року, концепцією реформування транспортного сектору економіки та Морською доктриною на період до 2035 року. Дисертаційні дослідження виконані на кафедрі Управління судном та кафедрі Судноводіння у межах тематичних планів Херсонської державної морської академії, пов'язані із дослідженнями у рамках науково – дослідної лабораторії «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом суден», науково – дослідними роботами та проектами, що фінансуються із видатків загального фонду державного бюджету.

Мета наукового дослідження полягає у підвищенні ефективності автоматизованих систем керування рухом судна в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів: автоматизації процесів прокладання маршруту, оптимізації маневрів розходження, врахування інтересів усіх учасників операції під час планування маршруту та розходження, зменшення впливу людського чиннику на процеси керування рухом судна, підвищення надійності та безпеки судноплавства.

Наукова гіпотеза дослідження полягає у можливості застосування розподілених систем керування з центральним бортовим обчислювачем та модулями автоматичного керування рухом судна, що мають різні функціональні можливості, дозволяє оператору вибирати оптимальний функціональний модуль для вирішення конкретної задачі, зменшуючи вплив людського чиннику на процеси керування та підвищуючи ефективність процесів керування за рахунок використання сучасних методів обробки інформації, теорії керування та оптимального керування у програмному забезпеченні.

Головне завдання дослідження полягає у розробці моделей, методів та засобів автоматизації процесів прокладання маршруту та розходження суден, що зменшують вплив людського чиннику на процеси керування, забезпечують оптимізацію функціоналу якості керування для усіх учасників операції в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів.

Досягнення мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Проведення комплексного аналізу сучасного стану розвитку моделей та методів підвищення безпеки судноплавства.
2. Подальший розвиток принципів підвищення безпеки судноплавства: поле ризиків, еталонне поле ризиків; прокладання маршруту руху судна, спільне розходження суден у полі ризиків при русі по маршруту; мінімізація ризиків для усіх учасників операції.

3. Розробка методу планування маршруту руху судна у полі ризиків: використання критерію ризику в задачі планування маршруту руху судна; оптимальні траєкторії руху судна при збереженні заданого ризику; метод градієнта у задачі планування маршруту руху судна; математичне моделювання процесів планування маршруту руху судна.

4. Розробка методу розходження суден у полі ризиків: використання критерію ризику в задачі спільного розходження суден; оптимізація розходження суден; метод градієнта у задачі розходження суден; математичне моделювання процесів розходження суден.

Об'єкт дослідження – процеси автоматичного оптимального планування маршруту та розходження суден в умовах невизначеності зовнішніх і внутрішніх факторів при русі по маршруту.

Предмет дослідження – принципи, методи і моделі автоматичного планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності зовнішніх і внутрішніх факторів при русі по маршруту.

Методи дослідження:

- сходження (дедукції) під час інформаційного пошуку;
- порівняння, при аналізі літературних джерел, визначенні переваг розроблених методів керування над існуючими;
- спостереження, уявний експеримент, вимірювання, моніторинг при проведенні досліджень на судні, навігаційному тренажері NaviTrainer 5000;
- формалізація, ідеалізація, абстрагування при описанні досліджуваних процесів у вигляді математичних формул та можливості подальшого застосування математичних методів дослідження;
- аналіз і синтез для перевірки правильності отриманих результатів у єдиному процесі;
- сценарний підхід для генерації альтернативних ситуацій пов'язаних з ризиком;
- прийняття рішень для вибору критеріїв ефективних та оптимальних рішень з гарантованої безпеки;
- числові методи інтегрування, при проведенні математичного

моделювання впрограму середовищі для комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше розроблено:

- метод побудови поля ризику, який полягає у використанні в якості суднового домену двохвимірною розподілу Гауса із середньоквадратичними значеннями невизначених факторів (похибок вимірювання положення судна та цілей, часткової невизначеності характеристик судна та суден цілей, часткової невизначеності математичних моделей судна та суден цілей, тощо), на відміну від існуючих рішень, забезпечує планування маршруту, контроль руху судна по маршруту та розходження суден при русі по маршруту із наперед заданим ризиком зіткнення, що дозволяє підвищити безпеку судноводіння;

- метод оптимального розходження суден у полі ризиків, який полягає в організації розходження зміною курсу руху судна шляхом ковзання по еліпсу заданого ризику, на відміну від існуючих рішень, забезпечує можливість оптимального розходження суден (мінімізацію траєкторії розходження) із наперед заданим ризиком, що дозволяє підвищити безпеку судноводіння;

- метод виходу на траєкторію заданого ризику та сходу із траєкторії заданого ризику при виконанні маневру розходження суден, який полягає у визначенні позиції початку маневру циркуляції, виконанні маневру циркуляції, визначенні позиції закінчення маневру розходження та виконанні маневру циркуляції для повернення на первинний курс, що надає можливість точного виходу на траєкторію розходження та повернення на первинний курс по закінченні виконання маневру розходження;

Удосконалено:

- підхід до планування маршруту, який полягає у використанні бортового обчислювача для визначення маршруту руху судна у полі ризиків з використанням градієнтних методів, на відміну від існуючих рішень, забезпечує автоматичну прокладку маршруту з використанням новітніх

технологій: цифрових морських навігаційних карт, гідрометеорологічних карт, графіків руху інших суден, повідомлень мореплавцям, тощо, що дозволяє значно скоротити час підготовки судна до запланованого рейсу, оптимізувати маршрут руху судна, зменшити витрати палива, підвищити безпеку судноплавства;

Набули подальшого розвитку:

- принципи підвищення безпеки мореплавства, що полягають у плануванні маршруту, реалізації руху судна по маршруту, розходженні судна на маршруті із заздалегідь не запланованими цілями, на відміну від існуючих рішень, враховують інтереси усіх учасників операції як на етапі планування маршруту, так і на етапі контролю руху судна по маршруту, та дозволяють значно підвищити ефективність мореплавства та знизити ризики зіткнення суден.

Наукове значення результатів дисертаційного дослідження полягає у: використанні поля ризиків для вирішення задач автоматичного планування маршруту та оптимального розходження із суднами цілями; розробці принципів, методів та засобів автоматичного планування маршруту; вирішенні задачі оптимізації траєкторії розходження, за умови не перевищення заданого ризику; врахуванні інтересів усіх учасників операції розходження, за рахунок використання системного підходу, аналізу і синтезу, методів та інструментів проектування, моделювання та оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення, на основі розроблених принципів, методів та засобів, модулів автоматичного планування маршруту та автоматичного оптимального розходження у полі ризиків, із врахуванням інтересів усіх учасників операції, що дозволяє зменшити вплив «людського чиннику» на процеси керування рухом судна, підвищити безпеку судноводіння, скоротити час підготовки судна до рейсу, довжину маршруту, час руху по маршруту та витрати палива. Розроблені принципи, методи та побудоване на їх основі алгоритмічне і програмне забезпечення модулів автоматичного керування перевірені

числовим моделюванням у середовищі MATLAB та стенді імітаційного моделювання у замкнутому контурі із математичною моделлю об'єкту керування. Результати математичного моделювання підтвердили працездатність та ефективність розроблених методів, що дозволяє рекомендувати їх для використання у автоматизованих системах з автоматичними модулями керування.

Працездатність та ефективність розроблених методів, алгоритмічне та програмне забезпечення у середовищі MATLAB та на стенді імітаційного моделювання Navy Trainer 5000 тренажерної лабораторії ХДМА.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці принципів, моделей і методів автоматизації процесів підготовки судна до рейсу в частині прокладання маршруту, автоматизації процесів розходження суден під час руху по маршруту, що забезпечують оптимізацію функціоналу якості керування для усіх учасників операції в умовах невизначеності зовнішніх та внутрішніх факторів. Наукові результати, зазначені в дисертаційній роботі, висвітлені:

- у фахових виданнях України за спеціальністю 151: 2 статті у журналі «Науковий вісник ХДМА», 1 стаття у журналі «Технологічний аудит та резерви виробництва», 1 стаття у журналі «Наука і Техніка сьогодні»,

- 1 стаття у виданні «Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies» та 2 статті у виданні «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies», що індексуються у базі даних SCOPUS та відносяться до кватилів (Q1-Q3);

- 2 статті у журналі «RadioElectronics, ComputerScience, Control», 1 стаття у журналі «Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics», 1 стаття у журналі «Electrical, Control and Communication Engineering», проіндексованих у базі даних WoS.

Результати проведених досліджень впроваджені:

- у навчальний процес кафедр «Управління судном» та «Судноводіння» Херсонської державної морської академії, в частині застосування - методу

побудови поля ризику, що полягає у використанні в якості суднового домену двохвимірною розподілу Гауса із середньоквадратичними значеннями невизначених факторів; методу автоматичного прокладання оптимального маршруту, із використанням градієнтних процедур; методу оптимального розходження суден у полі ризиків, що полягає в організації розходження курсом шляхом «ковзання» по еліпсу заданого ризику цілі; методу підвищення безпеки судноплавства, що полягає у врахуванні інтересів усіх учасників операції (20 вересня 2022 р.);

- у навчальний процес Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», кафедра «Навігація та управління судном», в частині удосконалення принципів підвищення безпеки судноплавства, автоматизації процесів планування оптимального маршруту, та оптимального розходження суден при русі по маршруту у полі ризиків при збереженні заданого ризику зіткнення (27 вересня 2022 р.);

- у освітній процес курсів підвищення кваліфікації та сертифікаційної підготовки командного складу судноводіїв приватного товариства «Ізмаїльський морський тренажерний центр» «Марін Про Сервіс», в частині методу побудови суднового домену із врахуванням середньоквадратичних значень невизначених факторів прокладання маршруту, ефективності розходження під час виконання рейсу і як результат, зменшення впливу «людського чинника» на виникнення небезпечних та аварійних ситуацій (04 жовтня 2022 р.).

У додатку А представлена технологічна карта наукового дослідження.

РАЗДІЛ І. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

1.1. Аналіз причин аварій на морському транспорті

Проблема безпеки судноплавства є комплексною проблемою, що включає економічні, технічні та природні фактори, які впливають на систему прийняття рішень командою ходового містка [37, 38, 39]. Динаміка розвитку морських перевезень, типів суден, вантажів та аварійності розглянута в роботах [40-44], питання оцінки ризиків, при виконанні операцій судноводіння, висвітлені у джерелах [45, 46]. У роботах [47, 48] наведені дані динаміки тоннажу у світовій морській торгівлі, рис.1.1а), кількість зареєстрованих морських аварій та інцидентів станом на 2020 рік, рис.1.1б), та загальні втрати торговельного флоту за 2010-2019 р.р., рис.1.1в).

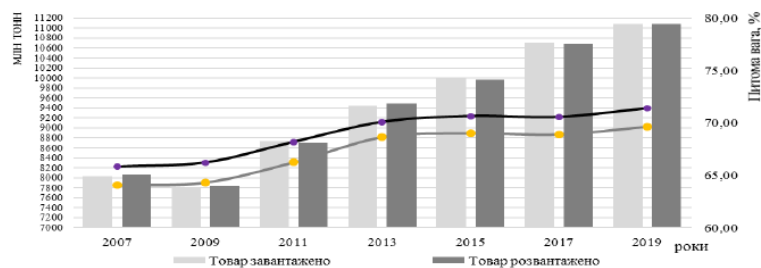


Рисунок 1.1а) - Динаміка тоннажу у світовій морській торгівлі,
МЛН ТОНН

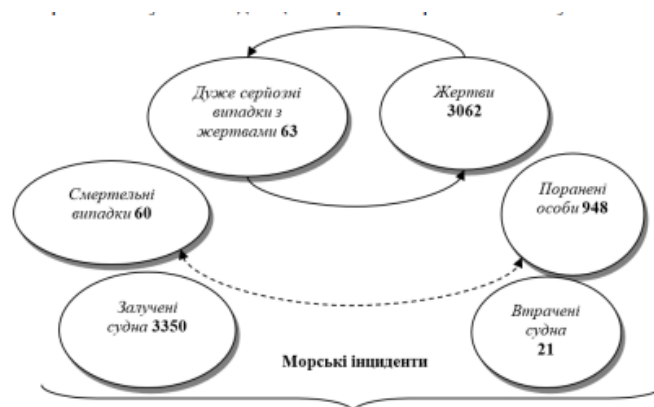


Рисунок 1.1б) - Кількість зареєстрованих морських аварій та інцидентів станом на 2020 рік

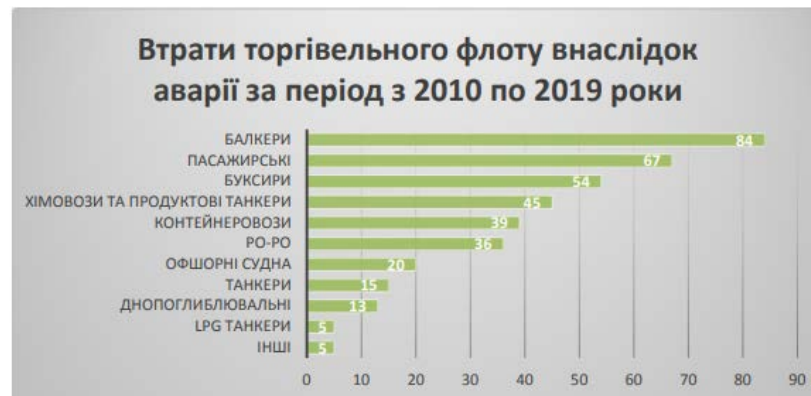


Рисунок 1.1в) - Загальні втрати торговельного флоту за 2010-2019 р.р

Як видно із наведених графіків, кількість аварій із року в рік зменшується, але в них залучаються судна із великим тонажем. За даними EMSA у 2019 було зареєстровано 3062 події, число постраждалих скоротилося на 200 осіб, зазнало аварії 21 судно. В цілому за період з 2014 по 2019 роки відбулося 320 нещасних випадків, в результаті яких загинуло 496 осіб, при цьому 88,3% жертв з яких склали члени екіпажу. Аналізуючи питання аварійності вантажних суден виявлено, що за період 2019 року 1382 вантажних судна були залучені в аварії або інші інциденти, в результаті яких загинуло лише одне вантажне судно.

Для забезпечення безпеки судноплавства необхідно враховувати причини аварій, які можна проаналізувати, наприклад, використовуючи відкриті дані European Maritime Safety Agency (EMSA), рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Причини аварій по даним EMSA у відсотках

Аналізуючи наведені дані, інші дані вітчизняних і закордонних джерел, можна дійти висновку, що основною причиною підвищеної аварійності суден є «людський чинник». Втома, стрес, умови депривації, тривалі контракти без можливості своєчасного списання з судна по закінченню контракта по найму, страх захворіти на COVID 19 та інші фактори призводять до неухважності, втрати контролю і, як наслідок, до аварійних ситуацій, що, в свою чергу, позначається на ефективності комерційної роботи судна. У роботах [49 - 54] досліджуються динамічні характеристики автоматизованої системи прийняття рішень за участю людини оператора у контурі керування та робиться висновок про доцільність заміни математичної теорії процесу прийняття рішень аналізом можливостей комп'ютерних систем та використанням оптимізаційних процедур як основи технічних і організаційних рішень [55].

Таким чином, на сьогоднішній день існує два шляхи зменшення кількості аварій на морському транспорті, пов'язаних із помилками команди ходового містка. Це, по-перше, більш якісна підготовка і тренінг членів команди ходового містка і, по-друге, підвищення рівня автоматизації процесів керування рухом судна. Власне, ці обидва напрямки розвиваються паралельно, як єдині сторони процесу підвищення безпеки [56-60].

З метою підвищення рівня підготовки судноводіїв, запроваджуються сучасні технології, зокрема інформаційні системи моделювання (тренажери) для відпрацювання навиків керування судном. Головною особливістю електронних тренажерів є реалістичність фізичних процесів, які моделюються у системі. Декілька таких навігаційних тренажерів «Navi-Trainer Professional 5000» від компанії Транзас («Повнофункціональний навігаційний ходовий місток», «Повнофункціональний тренажер використання РЛС і ЗАРП для розходження суден», «Повнофункціональний тренажер системи динамічного позиціонування» та «Інформаційні навігаційні системи» створено у Херсонській державній морській академії. Тренажери дозволяють проводити моделювання навігаційного процесу,

наближеного до реальних умов. Усі тренажери мають сертифікати на відповідність реальним процесам, що відбуваються під час керування на реальних суднах. На тренажері є можливість використовувати різні математичні моделі власного судна, суден цілей, командних приладів, виконавчих пристроїв, імітувати їх відмови, створювати погодні умови та візуалізувати усі ці дані, що дає незаперечні переваги. База даних тренажерів містить близько 20 математичних моделей суден та 20 районів плавання. Очікується, що світовий ринок систем повітряного, наземного, космічного та військово-морського моделювання виросте із приблизно 28 млрд. дол. США у 2013 році до 38 млрд. дол. США у 2024 році.

На рис. 1.3 наведено графік прогнозовано росту ринку симуляторів і тренажерів по рокам (у млн. дол.)

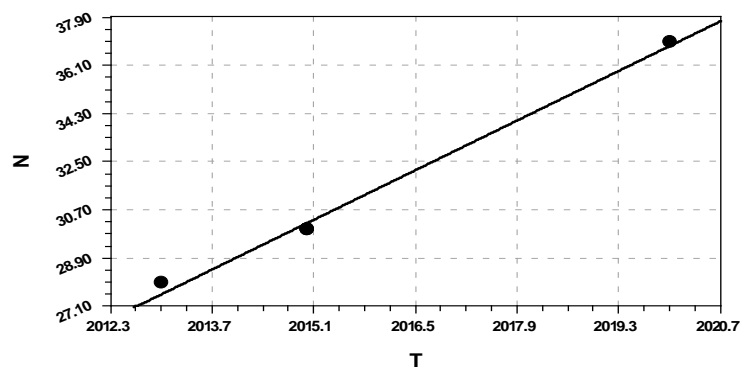


Рисунок 1.3 – Прогнозований ріст ринку симуляторів і тренажерів у млн. дол. по рокам

Разом з тим слід зазначити, що і після тривалого навчання та тренінгу на сучасних тренажерних комплексах, на практиці, при реальній експлуатації судна, часто виникають аварійні ситуації на морі, що безпосередньо пов'язані з контролем руху судна [38, 39, 49, 51]. Тому фахівці морської галузі вважають, що значного зменшення аварійності можна досягти лише шляхом зменшення впливу «людського чиннику» на процеси керування рухом судна, тобто через зростання рівня автоматизації всієї інформаційно-керуючої системи ходового містка судна, формування автоматизованих

систем морських перевезень [58-60], створення, у подальшому, автономних суден [61] та автономних судноплавних систем [62-64].

1.2. Сучасні системи та методи підвищення безпеки судноводіння

Виходячи з ієрархії інформаційної системи керування ходового містка і ґрунтуючись на аналізі задач, що вирішуються у процесі керування рухом судна, можна отримати модель всього комплексу керування рухом судна. На рис. 1.4 наведена інформаційно-керуюча система ходового містка. Параметри вектору стану судна $x(t)$, виміряні параметри вектору стану $x_m(t)$, зовнішні впливи $g(t)$ та керування $U(t)$ визначають динаміку руху судна. Вони також використовуються для оцінки ситуації на верхньому (директивному) рівні інформаційно-керуючої системи ходового містка.

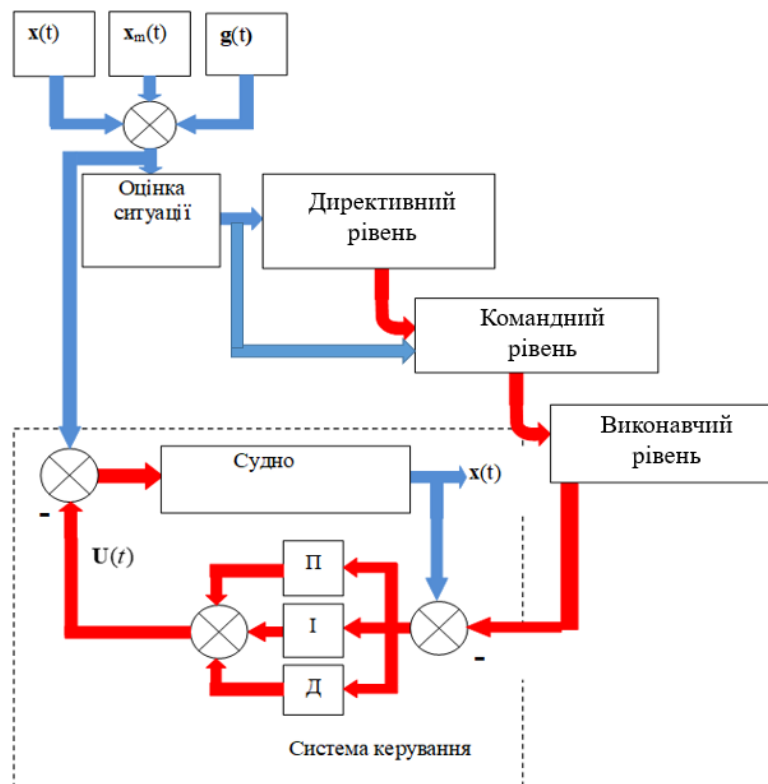


Рисунок 1.4 – Інформаційно – керуюча система ходового містка

Задачі директивного керування вирішуються капітаном судна. Другий (командний) рівень ходового містка забезпечує виконання основних операцій по підготовці судна до рейсу та під час рейсу. Підготовка судна до рейсу

включає складання та реалізацію грузового плану, розрахунок остійності судна, підбір та підняття карт у навігаційному відношенні, прокладання маршруту, з використанням електронної картографічної системи ECDIS, із врахуванням навігаційних небезпек, очікуваних метеоумов, небезпечних зон, тощо. Під час рейсу командний рівень забезпечує неухильний рух судна по прокладеному маршруту, оперативне корегування маршруту, при виникненні непередбачуваних обставин, постійне візуальне, слухове, радіолокаційне та інше спостереження відповідно до переважаючих умов та обставин (правила МПЗС-72). Командний рівень на судні забезпечується помічниками капітана. Третій (виконавчий) рівень призначений для виконання команд вищого (командного) рівня щодо керування рухом судна. Виконавчий рівень на судні забезпечується рульовим або автопілотом.

Основним навігаційним обладнанням, що використовується у системах автоматизованого керування сучасних суден є [65-73]:

- система електронної картографії ECDIS;
- автоматична ідентифікаційна система AIS (ЗНО);
- інтегровані системи ходового містка / інтегровані навігаційні системи IBS / INS;
- засоби автоматичної радіолокаційної прокладки ARPA;
- системи ідентифікації та стеження на великій відстані LRIT;
- служба руху суден VTS;
- глобальна система безпеки на морі GMDSS.

ECDIS (Electronic Chart Display & Information System) є однією із найважливіших навігаційних систем, що використовується на сучасних суднах. Робота ECDIS заснована на використанні та відображенні цифрової картографічної та навігаційно-гідрографічної інформації у вигляді електронних карт. ECDIS на сьогоднішній день практично витіснили паперові карти і є основним інструментом планування і контролю над здійсненням переходу. Головна перевага над паперовою картографією під час використання ECDIS на суднах полягає у підвищенні рівня автоматизації

діяльності судноводія, в його забезпеченні більш надійною і достовірною безперервною інформацією про картографічну і навігаційну обстановку. Використання ECDIS стає особливо актуальними у зв'язку з ухваленням Резолюції IMO MSC 282(86), де викладено вимоги щодо оснащення всіх категорій суден обладнанням ECDIS, що, згідно з Конвенцією SOLAS-74, може застосовуватися замість паперових навігаційних карт. Процедура безпосереднього і безперервного контролю за рухом і місце знаходженням судна з використанням ECDIS має відмінності від процедури, виконуваної без застосування цифрових технологій. Тому, перш ніж приступати до її використання, необхідно чітко знати функціональні можливості ECDIS, її переваги та недоліки.

До переваг ECDIS відносять:

- забезпечення судноводія інтегральною навігаційною інформацією від різних технічних засобів навігації (РЛС, ЗАРП, СНС та ін.);
- зменшення похибок масштабу і напрямків на системній електронній карті (SENC) через автоматичне розміщення головної паралелі карти у середині екрана;
- підвищення навігаційної безпеки за рахунок врахування гідрографічної обстановки з використанням цифрової моделі навігаційної карти та суміщення радіолокаційних і картографічних даних;
- автоматичне корегування електронних навігаційних карт.

До недоліків використання ECDIS відносять: електронні навігаційні карти відображаються на звичайних дисплеях, площа яких дозволяє відобразити лише 1/6 частину паперової навігаційної карти традиційних розмірів при однаковому масштабі. Через це потрібна більш часта зміна зображення. Часткове усунення цього недоліку досягається застосуванням двох екранів, на одному з яких відображається карта району, а на іншому – карта частини цього району у більшому масштабі; з-за наявності в ECDIS функції електронної зміни масштабу можливе відображення навігаційної карти у великому масштабі, при якому не забезпечується необхідна точність

вимірювань та не підтримується детальний зміст. У цьому випадку оператор ECDIS у автоматичному режимі отримує звукове попередження про небезпечний масштаб карти; при роботі з дисплеями спостерігається підвищена втомлюваність операторів; для роботи з ECDIS необхідна спеціальна підготовка операторів з метою її ефективного використання та подолання психологічного бар'єру перед новими нетрадиційними технічними засобами.

ECDIS є інтегрованою інформаційною системою. Можливо накладання радіолокаційної картини на електронну навігаційну карту, накладання інформації по АІС-цільях. Для цього, використовуються оперативні функції <ARPA>,<AIS>, розміщені на інформаційній панелі ECDIS вгорі у правому кутку дисплея. Після активації цих функцій, на дисплеї з'являються інформаційне відображення, щодо цілей навколо судна, за інформацією з ARPA та AIS (ЗНО). Курсор приймає вигляд оранжевого кола, який можна підвести до об'єкту на карті і натиснути ліву кнопку миші (ЛКМ). Після цього на екрані ECDIS з'являється інформація про ціль. Відображення інформації РЛС, ЗАРП, АІС (ЗНО) на одному екрані, крім зручності сприйняття інформації, також дозволяє проводити звірку і взаємний контроль електронних навігаційних систем, накладена радарна картинка повинна узгоджуватися з інформацією АІС (ЗНО) та інформацією на електронній карті. У іншому разі одна із систем працює не коректно і довіряти такій інформації не можна. Можливими причинами появи помилки можуть бути, наприклад: неправильні налаштування RADAR/ARPA або неправильно обраний еліпсоїд GPS приймача.

Іншою важливою системою, що використовується у системі автоматизованого керування рухом судна, є засоби автоматичної радіолокаційної прокладки (ЗАРП). Це електронні пристрої обробки радіолокаційних даних, призначені для попередження зіткнень суден у морі і для вирішення навігаційних завдань. Загальним для всіх ЗАРП є використання мікроконтролеру для обробки радіолокаційних даних і

відображення результатів обробки на індикаторі кругового огляду суднової РЛС у цифровій та графічній формі (у вигляді векторів відносної та абсолютної швидкостей, символів, охоронних зон (секторів або кілець), позначок минулого положення цілей, тощо). До основних функцій ЗАРП відносяться:

- радіолокаційне виявлення цілей;
- ручне та (або) автоматичне захоплення цілей на автосупровід;
- автоматичний супровід цілей; обчислення та відображення даних оцінки небезпеки ситуації;
- програвання маневру для визначення параметрів розходження з багатьма цілями;
- візуальна та (або) звукова сигналізація у разі небезпечної ситуації.

У деяких моделях ЗАРП забезпечується також:

- відображення на індикаторі кругового огляду меж фарватеру (навігаційних ліній) та точок повороту;
- автоматичне визначення місця судна по нерухомому радіолокаційному орієнтиру з відомими координатами;
- обчислення зносу судна із заданої траєкторії; визначення швидкості судна відносно нерухомих орієнтирів.

АІС (ЗНО) (Автоматична ідентифікаційна система засобу навігаційного обладнання) - система в судноплавстві, що служить для ідентифікації суден, їх габаритів, курсу та інших даних. Останнім часом з'явилася тенденція трактувати АІС як Автоматична Інформаційна Система, що пов'язано з розширенням функціональності системи порівняно з ординарним завданням ідентифікації суден. Відповідно до Конвенції SOLAS-74 за Протоколом від 10 листопада 1988 року, на Міжнародній конференції з гармонізованої системи огляду та оформлення свідоцтв, було прийнято, встановлення АІС є обов'язковим для суден валовою місткістю понад 300, що здійснюють міжнародні рейси, суден валовою місткістю 500 і більше, що не здійснюють міжнародні рейси, та всіх пасажирських суден. Судна та яхти з

меншою водотонажністю можуть бути обладнані приладом класу Б. Дія АІС заснована на прийомі та передачі повідомлень в УКХ-діапазоні (частота 161,975 МГц і 162,025 МГц). Передавач АІС працює на більш довгих хвилях, ніж радари, що дозволяє проводити обмін інформацією не тільки на прямих відстанях, а й місцевості, що має перешкоди у вигляді невеликих об'єктів, а також за поганих погодних умов. Хоча достатньо одного радіоканалу, деякі АІС системи передають та отримують інформацію по двох радіоканалах для того, щоб уникнути проблем інтерференції та не порушувати комунікацію інших об'єктів. Повідомлення АІС можуть містити: ідентифікаційну інформацію про об'єкт, інформацію про стан об'єкта, що отримується автоматично з елементів керування об'єктом (у тому числі і з деяких електрорадіонавігаційних приладів), інформацію про географічні та часові координати, які АІС отримує від глобальної навігаційної супутникової системи, інформацію, що вводиться вручну обслуговуючим персоналом. Передбачено також надсилання додаткової текстової інформації між терміналами АІС (пейджинг). Передача такої інформації можлива як на адресу всіх терміналів у радіусі дії, так і на один певний термінал. З метою забезпечення уніфікації та стандартизації АІС у Міжнародному Регламенті Радіозв'язку закріплено для використання з метою АІС два канали: AIS-1 (87В – 161,975 МГц) та AIS-2 (88В – 162,025 МГц), які повинні використовуватися скрізь, за винятком регіонів з особливим частотним регулюванням. Швидкість передачі цифрової інформації в каналі АІС 9600 біт/с. Робота кожної станції АІС (мобільної або базової) синхронізована за часом UTC з похибкою не більше 10 мкс від вбудованого приймача GPS. Для передачі інформації використовуються кадри, що безперервно повторюються, тривалістю 1 хвилина, які розбиваються на 2250 слотів (тимчасових інтервалів) тривалістю по 26,67 мс. Для тексту використовують 6-бітові коди ASCII. Відображення інформації про навколишню обстановку у сучасних АІС можливе в 2 режимах - як текстовому, у вигляді таблиці з переліком розташованих поруч суден та їх даних, так і у вигляді спрощеної

схематичної карти, із зображенням взаємного розташування суден та відстаней до них (розраховується автоматично за переданими географічними координатами). АІС входить до переліку обладнання, що забезпечується безперебійним живленням від акумуляторів в обов'язковому порядку.

Модулі автоматичного керування курсом руху судна (авторульові) забезпечують автоматичне підтримання заданого курсу та маршруту руху судна, використовують виміряну інформацію гірокомпасу та датчику кутової швидкості ристання для забезпечення асимптотичної стійкості на курсі. Вихідний сигнал автопілоту подається на кермові механізми судна. Кути перекладки пера стерна при автоматичному керуванні на 20-30% менше, ніж при ручному. Авторульовий дозволяє: підвищити точність утримання судна на курсі; збільшити експлуатаційну швидкість судна у середньому на 2-3%; зменшити механічне зношування кермових агрегатів. Новий тип авторульових - адаптивний, з автоматичним налаштуванням параметрів схеми при зміні зовнішніх умов плавання або швидкості руху, забезпечує оптимальний режим роботи без участі людини (оператора). Адаптивні авторульові використовуються головним чином на великотонажних судах для поліпшення їх керованості, особливо при русі з малою швидкістю, на мілководді та в обмежених водах. Вони створюють додатковий економічний ефект шляхом зменшення пропульсивних втрат.

Більш розвинутими у плані автоматизації процесів керування є системи динамічного позиціонування (DP-systems), які виробляються корпораціями Rolls – Roys, Navis, MarineTechnology, Kongsberg, Transasta ін. і встановлюються на пасажирських, військових судах, судах забезпечення нафтових та газових платформ, кабелеукладачах, трубоукладачах, самих платформах, інших судах, до систем керування якими приділяються більш підвищені вимоги по точності, надійності та безпечності. Системи керування таких суден мають надлишкові структури, які в основному використовуються для підвищення надійності та частково для підвищення ефективності процесів керування. DP-systems є модульними розподіленими

автоматизованими системами із вбудованим обчислювачем та де-якими додатковими вузькоспеціалізованими функціями автоматичного керування. У вбудованому обчислювачі DP-systems використовується математична модель судна для оцінки параметрів вектору стану та зовнішніх впливів. Разом з тим, системи динамічного позиціонування не є відкритими та не мають можливостей нарощування функцій автоматичного керування.

Електронна навігація (e-navigation) - це стратегія, розроблена Міжнародною морською організацією (ІМО), спеціалізованим агентством ООН, для полегшення судноплавства за рахунок кращої організації даних на судах та на березі, а також кращого обміну даними та зв'язку між суднами та берегом. За даними Управління з розслідування морських пригод Сполученого Королівства, навігаційні помилки та збої, у тому числі пов'язані з людським фактором, були значними у більш ніж половині інцидентів. Також було зазначено, що аварії продовжують відбуватися, незважаючи на розробку та доступність ряду судових та берегових технологій, що покращують ситуаційну поінформованість та здатність приймати рішення. До них відносяться автоматична ідентифікаційна система AIS (ЗНО), система електронної картографії ECDIS, інтегровані мостові системи / інтегровані навігаційні системи IBS / INS, засоби автоматичної радіолокаційної прокладки ARPA, радіонавігація, системи ідентифікації та стеження на великій відстані LRIT, Служба руху суден VTS та Глобальна морська система зв'язку і порятунку на морі GMDSS. Тому було запропоновано додати новий пункт з електронної навігації до програми роботи Комітету з безпеки мореплавства NAV, а також до програми з радіозв'язку, пошуку та рятування COMSAR. Мета полягала у розробці стратегічного бачення використання існуючих та нових засобів навігації, зокрема електронних, цілісним та систематичним чином. Електронна навігація може допомогти зменшити кількість аварій, помилок та збоїв у логістиці при експлуатації суден для перевезенні вантажів водними шляхами, за рахунок розробки та впровадження стандартів точної та рентабельної системи, яка зробить

важливий внесок у програму ІМО з безпечного, надійного та ефективного Міжнародного судноплавства.

1.3. Методи планування маршруту руху судна при підготовці судна до виконання рейсового завдання

Мета планування маршруту руху судна, щодо запланованого рейсового завдання, полягає у забезпеченні його безпечного та оптимального виконання. Планування маршруту включає в себе проработку великого об'єму навігаційної, гідрометереологічної та логістичної інформації що до руху судна по маршруту починаючи від причалу порту відходу до причалу порту призначення. При цьому необхідно забезпечити безпеку екіпажу судна, судна як об'єкту експлуатації, вантажу що перевозиться, навколишнього середовища та виконання логістичного розкладу для отримання економічних показників. Одним з важливих факторів, що впливає на виконання перелічених складових планування маршруту досягається за допомогою надійного контролю положення судна на маршруті протягом усього навігаційного переходу. Необхідність планування маршруту руху судна стає ще більш актуальною у зв'язку з збільшенням чисельної кількості, тоннажу світового флоту задіяного для перевезення вантажів морськими та річковими шляхами, підвищенням інтенсивності судноплавства та скороченням чисельності екіпажів суден. Практичне значення планування маршруту руху судна полягає у тому, щоб заздалегідь вибрати відповідні методи контролю положення судна на різних ділянках навігаційного переходу. При русі судна на фарватерах, у стислих водах, на мілководді, дуже важливого значення набуває спостереження за станом навколишнього оточення, особливо за курсом руху та швидкістю власного судна, та суден цілей, запасом води під кілем а також вибір оптимальних методів розходження суден. Для правильного застосування цих методів необхідно заздалегідь провести детальне опрацювання плану маршруту для запланованого навігаційного переходу. Правильне і ретельне планування маршруту руху судна забезпечує

безпечні аспекти плавання судна за маршрутом, проте, якщо план навігаційного переходу не виконано або виконано неналежним чином, то вирішення виникаючих при цьому навігаційних, погодних та логістичних ускладнень можуть призвести до необґрунтовано великих витрат. У Конвенції ПДМНВ-78/95, у розділі «Основні принципи спостереження при несенні ходової вахти» наголошується: «Майбутній рейс повинен бути спланований заздалегідь з урахуванням усієї інформації, а будь-який прокладений курс повинен бути перевірений до початку рейсу». Необхідність планування рейсу і загальні вимоги до виконання цієї процедури викладаються у наступних міжнародні документах: СОЛАС 74/78, розділ V, Безпека; ПДМНВ 78/95, розділ VIII, частина 2 (Загальні вимоги по плануванню рейсу); Резолюція ІМО А.893 (21) від 25 листопада 1999 року «Керівництво з планування рейсу».

Оцінка запланованого переходу (Passageplan Appraisal). Після отримання рейсового завдання починається збір інформації щодо попереднього опрацювання маршруту запланованого навігаційного переходу. Підбором інформації, щодо майбутнього рейсу, виконується навігаційним помічником капітана та надається для подальшої оцінки капітану судна на підставі наступних документів: 1. Каталог карт; 2. Навігаційні карти; 3. Океанські шляхи світу; 4. Путьові і великомасштабні карти; 5. Карти з рекомендованими шляхами, затвердженими ІМО; 6. Настанови для плавання і лоцїї; 7. Списки вогнів і знаків; 8. Таблиці припливів; 9. Атласи течій; 10. Повідомлення мореплавцям (НАВАРЕА, термінові повідомлення про небезпеки); 11. Інформація по зв'язку (включаючи систему керування рухом суден (СКРС) і виклик лоцмана); 12. Інформація по клімату, метеорології та океанографії. Погода, стан моря, очікувані льодові обставини; 13. Електронні карти, щодо району плавання; 14. Таблиці відстаней; 15. Корегувальна інформація по електронним системам навігації; 16. Радіо і місцеві попередження; 17. Інші неопубліковані джерела і інформація судовласника;

18. Маневрові характеристики судна; 19. Осадка судна; 20. Довідник мореплавців; 21. Керівництво по заходу в порт; 22. Персональний досвід.

Планування переходу (Passageplanning). Планування переходу від причалу порту відходу до причалу порту приходу, є однією з обов'язкових умов підготовки судна до майбутнього виходу в море. Прокладання маршруту руху судна повинне бути добре виконане на відкорегованих навігаційних картах і в остаточному варіанті затверджене капітаном. При повторному використанні раніше відпрацьованого маршруту руху судна уточнюються вже відомі положення і враховуються нові дані, пов'язані зі змінами в навігаційних обставинах, а також враховується досвід, отриманий у попередніх рейсах. У плані переходу, складеному для попереднього рейсу, пункти зі змінними даними, такими як погода, інформація по течіям, повинні постійно оновлюватися та враховуватися при навігації. Також, якщо судно змінює район плавання або змінюється склад навігаційних помічників капітана, проводиться опрацювання запланованого переходу у повному обсязі. Прокладання маршруту руху судна виконується таким чином, щоб судно завжди знаходилося у безпечних водах, найбільш складні ділянки навігаційного переходу виділяються, а сам перехід розраховується за часом, перевіряється, визначаються усі необхідні навігаційні методи визначення положення місця судна для кожної ділянки переходу. Підготовка плану переходу повинна бути виконана до відходу судна в рейс. В стислих водах прокладання маршруту руху судна виконується при щільному контролі припливо-відливних явищ та постійному контролі запасу води під кілем, уникаючи, наскільки це можливо, різких змін курсів руху судна. Розглядається можливість альтернативних маршрутів руху судна для певних умов плавання, запасних якірних стоянок, відхилення від лінії маршруту руху при виникненні будь яких несподіваних ускладнень. План навігаційного переходу передбачає також розходження з іншими суднами згідно МПЗС-72, очікуваний напрямок вітру та течії. Планування навігаційного переходу умовно ділиться на дві стадії: перехід океаном і

відкритим морем та прибережне плавання і плавання у гирлах річок. Часом ці дві стадії частково збігаються. При підготовці плану переходу враховується наступне: глибини під кілем протягом усього переходу; збільшення осадки при русі судна (просідання), у тому числі з врахуванням кільової і бортової хитавиці при хвилюванні; збільшення осадки через наявність постійного крену і диференту; зміна глибин за рахунок припливно-відливних явищ; відповідність відстані до небезпек; очікуваний рух суден; надійність отримуваних даних; контроль положення судна після зміни курсів у поворотних точках, які можна надійно контролювати за допомогою радара і візуальних пеленгів на берегові об'єкти; зміну навігаційних карт, яка не повинна відбуватися у межах небезпечних ділянок навігаційного переходу; схеми розподілу руху і вимоги правила №10 МПЗЗС-72; заздалегідь розраховані припущення щодо моментів зміни напрямку течій; безпечну швидкість на протязі руху по маршруту; зони доповідей до СКР, частоти та канали УКХ, які використовуються при плаванні по системам розподілу руху; райони спеціального призначення, точки прийому лоцмана і буксирів при наближенні до порту; визначення планових точок повернення перед входом в райони з інтенсивним рухом, у разі непередбачених обставин (аварії, виходу з ладу приладів або механізмів, поганої видимості, або інших небезпечних ситуацій); використання первинних і вторинних методів визначення місця положення та орієнтації; вимоги до систем електронних навігаційних карт, що використовуються на маршруті; наявність останніх корегувань для навігаційних карт і посібників, що будуть використовуватися на запланованому переході, на день відходу з порту завантаження; стан устаткування ходового містка; визначення меж допустимих похибок на усіх ділянках маршруту руху, нанесення огорожувальних пеленгів і відстаней; визначення шляху океанського переходу (ортодромія, локсодромія або змішаний перехід); врахування крижаних та штормових районів, які можуть бути на шляху руху судна у дану пору року. Капітан особисто переконується, що план навігаційного переходу виконаний і враховує всі вимоги, щодо

забезпечення оптимального та безпечного маршруту руху судна, а навігаційні помічники капітана, які контролюють виконання затвердженого капітаном плану переходу під час несення ходової вахти, належним чином ознайомлені з ним. Роздрукований план переходу (passage plan), затверджений персональним підписом капітана, постійно знаходиться на ходовому містку під час руху судна по маршруту.

1.4. Моделі та методи розходження суден

Основним міжнародним правовим документом, що регламентує безпеку судноплавств є МПЗЗС - Міжнародні Правила запобігання зіткненню суден у морі (International Rules of Preventing Collision at Sea, COLREGS), універсальний міжнародний договір (конвенція), учасниками якого є 153 держави, в тому числі й Україна. Діючі Міжнародні Правила 1972 року (МПЗЗС-72) є додатком до Конвенції про Міжнародні правила запобігання зіткненню суден у морі, прийнятої в 1972 році в Лондоні на Міжнародній конференції та вступила в силу 15 липня 1977 року. У МПЗЗС-72 вносили зміни в 1981, 1987, 1989, 1993, 2001 і 2007 роках. Правила застосовуються лише у випадках, коли виникає небезпека зіткнення. Якщо ж судна знаходяться на виду один у одного і йдуть такими курсами і з такими швидкостями, що це не створює загрозу руху або небезпеку зіткнення, правила не використовуються. Правила МПЗЗС-72 є вербальними (і тому іноді трактуються судноводіями по-різному), більше орієнтовані на інтуїцію судноводія а не на точний математичний розрахунок, розглядають лише послідовне розходження двох суден [74, 75]. Після встановлення на судах РЛС з'явилася можливість вимірювати параметри відносного руху судна та цілей, а також проводити вручну графічні побудови на маневровому планшеті для визначення параметрів розходження [76-78]. Даний спосіб обчислення параметрів розходження суден має не високу точність, відрізняється великою трудомісткістю і у даний час не використовується. Сьогодні, для автоматизації обчислень, на судах використовуються засоби

автоматичної радіолокаційної прокладки ЗАРП [79-81]. ЗАРП звільняє судноводія від багатьох ручних операцій, а вбудована функція «Програвання маневру» надає судноводію зручний графічний інтерфейс для вирішення завдань розходження. Разом з тим, ЗАРП має і суттєві недоліки: ЗАРП є автоматизованою системою, що передбачає наявність у контурі керування людини оператора; функція ЗАРП «Програвання маневру» надає судноводію лише зручний графічний інтерфейс, але визначення параметрів розходження, як і раніше, проводиться вручну, що потребує часу; функція ЗАРП «Програвання маневру», як і при ручній радіолокаційній прокладці, не дозволяє розходитися із цілями, що маневрують, так як задача вирішується разово, перед початком маневру розходження.

Багато робіт вітчизняних та зарубіжних авторів також присв'ячено питанням автоматичного розходження. Так, у роботі Пасечнюк С.С. [82] запропоновано спосіб формування області неприпустимих значень курсу одного із суден та швидкості іншого судна, з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик, при зовнішньому керуванні процесом розходження. Залежно від параметрів ситуації небезпечного зближення та режиму гальмування судна, отримано аналітичні вирази для розрахунку меж області неприпустимих значень курсу та швидкості суден, що зближуються. Спосіб заснований на аналітичному описі неприпустимих значень курсу, що обмежує його можливості розрахунку розходження тільки з одним судном, що не маневрує. У роботі [83] описаний спосіб розходження, заснований на введенні коригуючої поправки до програмної швидкості перекладки керма у разі виявлення небезпечної цілі. Для визначення коригуючої поправки, за даними РЛС обчислюється широта і довгота цілі, шляховий кут цілі, швидкість руху цілі, за цими даними аналітично визначаються лінії курсів судна і цілі, а також точка їх перетину. Якщо точка перетину знаходиться в межах зони маневрування судна та цілі, то додатково перевіряється час руху судна та цілі до точки перетину курсів. При близьких значеннях часу руху судна та цілі до точки перетину курсів, точка перетину курсів буде точкою

зіткнення, тому вводиться коригуюча поправка в програмну швидкість перекладки керма, визначається новий курс руху судна після перекладки, і знову повторюється перевірка, що описана вище. Недоліками способу є використання широт і довгот при обчисленні параметрів руху цілі, що може призвести до значних похибок обчислення, використання тригонометричних функцій в рівняннях, які можуть вироджуватися за певних умов, а також можливість розходитися тільки з однією не ціллю, що не маневрує. У роботі [84] описаний спосіб розходження з використанням прогнозуючих моделей. З використанням математичних моделей власного судна і судна-цілі, у бортовому контролері прогнозуються траєкторії їх руху по вимірним значенням параметрів руху власного судна та оціненим значенням параметрів руху судна-цілі. Цей прогноз, з урахуванням правил МПЗЗС-72, використовується для визначення оптимальної стратегії керування розходження суден. Недоліком способу є велике навантаження на бортовий обчислювач у зв'язку з необхідністю реалізації множини прогнозів у реальному часі, а також можливість розходження лише з однією ціллю. У роботі [85] викладено методику прийняття рішень в автоматизованій системі розходження суден. Згідно із представленою методикою, у модулі генерації рішення формується множина можливих варіантів керування, із врахуванням правил МПЗЗС-72, із якої вибирається потрібна компонента. З метою скорочення часу пошуку рішення для генерації множини можливих варіантів, використовуються знання з бази, що містить відомості з різних варіантів маневрування судном при розходженні. Недоліком методики є її складність, необхідність постійного поповнення та супроводу бази даних, а також можливість розходитися лише з одною ціллю. У статті [86] описано систему керування з глибоким Q-навчанням. Перевага системи полягає у можливості оптимізації процесів керування на основі інформації про взаємодію судна із середовищем. Недоліками системи є необхідність організації зберігання інформації у базі даних, швидкого її пошуку та вилучення, обслуговування бази даних. Крім того, будь-яке навчання системи керування, включаючи і Q-

навчання, неприпустимо в екстремальних ситуаціях, наприклад, при керуванні у стислих водах, так як під час навчання система може працювати не оптимально або не коректно. У статті [87] описується використання АІС для відстеження руху суден-цілей за допомогою електронного обміну навігаційними даними між суднами з бортовими транспондерами, наземними та/або супутниковими базовими станціями. Зібрані дані містять великий обсяг інформації, корисної для безпечного судноплавства, і використовуються для виявлення маневрування суден-цілей, оцінки маршруту та прогнозування зіткнень. Використання даних АІС надає розширені можливості для запобігання зіткненням суден завдяки точнішій інформації про параметри їх руху, однак цей метод не може бути використаний на суднах, не обладнаних транспондерами АІС або суднах, які приховують інформацію про параметри свого руху. У результаті проведеного аналізу автори статті [88] дійшли висновку, що алгоритми запобігання зіткненням, розроблені протягом останніх десятиліть, дозволяють розходитися тільки з однією або двома цілями, що не маневрують, використовують спрощену динаміку руху власного судна і суден-цілей. Авторами статті запропоновані алгоритми розходження суден, що дозволяють візуалізувати небезпечні курси та швидкості власного судна, які можуть призвести до зіткнення. Система може також пропонувати оптимальні рішення щодо розходження суден у відповідність до Правил МПЗЗС-72. Проте, описана система належить до АСППР (Автоматизована Система Підтримки Прийняття Рішення) і може вирішувати задачу розходження суден лише за участю людини оператора. У роботі Lisowski [89, 90] розглянуті питання застосування моделі багатокрокової матричної гри для синтезу оптимального маневрування суден, що дозволяє визначати безпечну ігрову траєкторію власного судна в ситуаціях, коли воно зустрічається із великою кількістю об'єктів. Траєкторія описувалася як певна послідовність маневрів курсом та швидкістю. Комп'ютерна програма Risk Game Maneuvering (RGM), розроблена у середовищі MATLAB, враховує

МПЗЗС-72, динамічні характеристики та оцінки відхилення реальної траєкторії руху судна від її прогнозованих значень. Імітаційне тестування підтвердило здатність програми визначати правильну траєкторію руху судна у грі за умови, коли судно наближається до не занадто великої кількості об'єктів, або коли зазначені об'єкти знаходяться на великих відстанях між ними. У разі завищеного трафіку, програма не може визначити безпечний маневр розходження ігри. У роботах Lisowski [91-98] представлено застосування обраних методів теорії оптимального та ігрового керування рухом судна для визначення безпечної траєкторії руху власного судна при проходженні повз інші судна-цілі, що зустрічаються в умовах доброї та обмеженої видимості. Порівнюються п'ять алгоритмів визначення безпечної траєкторії руху власного судна у ситуації ризику зіткнення: некооперативна позиційна гра (NPG), некооперативна матрична гра (NMG), кооперативна позиційна гра (CPG), динамічна оптимізація (DO) та кінематична оптимізація (КО). Розглянуті алгоритми керування, у певному сенсі, є формальними моделями розумових процесів судноводія, який керує власним судном. Розроблені алгоритми враховують правила МПЗЗС-72, динамічні властивості судна, дозволяють оцінювати відхилення реальної траєкторії руху від заданої. Алгоритми можуть використовуватися для підтримки прийняття рішення судноводієм щодо безпечного маневрування у ситуаціях небезпечного зближення з використанням інформації ARPA. Використання алгоритмів на власному судні не залежить від того, чи використовують їх інші судна-цілі. Ігрові алгоритми NPG, CPG та NMG враховують, при прийнятті рішень, зміни курсу та швидкості власного судна, незалежно від того, взаємодіють вони чи ні у частині Правил МПЗЗС-72 з алгоритмами інших суден-цілей. У неігрових алгоритмах DO та КО зміна параметрів руху інших суден-цілей відстежується системою запобігання зіткненням ARPA та враховується в алгоритмі визначення безпечної траєкторії руху власного судна. Проведене моделювання підтверджує висновок про те, що алгоритм DO є найбільш ефективними серед розглянутих і може бути рекомендованим

для використання на практиці. У роботах Lisowski [99-106] розглянуто застосування обраних методів теорії ігор для автоматизації процесів керування рухом морських об'єктів. Визначено параметри вектору стану, керування та обмеження на параметри вектору стану, визначена цільова функція керування у вигляді платежів – інтегрального платежу та кінцевого платежу. Представлені багатоступінчасті позиційні та багатокрокові матричні, некооперативні та кооперативні, ігрові та оптимальні алгоритми керування у конфліктній ситуації. Результати проведених досліджень показали, що застосування моделей теорії ігор для синтезу оптимального керування при розходженні суден дозволяє: визначати безпечну траєкторію руху власного судна у ситуаціях розходження з великою кількістю зустрічних суден-цілей; враховувати правила МПЗС-72, динамічні властивості судна, оцінювати відхилення реальної траєкторії руху від заданої; визначати безпечну траєкторію руху власного судна по відношенню до усіх зустрічних суден-цілей, при застосуванні алгоритмів позиційного керування грою; визначати безпечну траєкторію руху власного судна стосовно найбільш небезпечного, при застосуванні матричних алгоритмів керування грою. У роботі Lisowski [107-109] розглянуто застосування динамічного програмування для визначення безпечної траєкторії власного судна при зустрічі з іншими суднами-цільями. При розробці процедур керування використовувалася динамічна модель процесу з кінематичними обмеженнями параметрів вектору стану, яка реалізована тришаровою штучною нейронною мережею. Для моделювання мережі використовувалася Neural Network Toolbox Matlab. Результати проведеного математичного моделювання показали, що: метод динамічного програмування з відносно точним описом динамічних властивостей системи дозволяє синтезувати безпечне та оптимальне керування розходженням суден; безпечна траєкторія руху судна може бути відображена на дисплеї ARPA як додаткова функція; судноводій має змогу керувати процесом генерації та оцінки різних варіантів розходження суден для ефективного прийняття рішень; нейронні мережі

можуть використовуватися як елементи системи оцінки безпеки руху суден, що проходять повз, із можливістю поточного коригування розмірів суднових доменів. Вони здатні представляти евристичні знання так само, як досвідчений судноводій; впровадження елементів обчислювального інтелекту, представленого нейронною мережею, може допомогти менш досвідченим судноводіям у прийнятті рішень, що підвищить безпеку судноплавства. У роботі [110] розглянуті питання комбінованого розрахунку (аналітичного та з використанням числових методів) параметрів розходження судна із багатьма суднами цілями, що маневрують, у бортовому обчислювачі. Для загального випадку комбінованого розходження суден записано векторне рівняння трикутника швидкостей у проєкціях на осі географічної системи координат

$$\begin{aligned} |V_{n1}| * E_{nx1} + |V_{olod}| * E_{olodx} &= V_{tgx}; \\ |V_{n1}| * E_{ny1} + |V_{olod}| * E_{olody} &= V_{tgy}; \\ (V_{tgx} - |V_{olod}| * E_{olodx})^2 + (V_{tgy} - |V_{olod}| * E_{olody})^2 &= |V_{n1}|^2; \end{aligned} \quad (1.1)$$

Де: $V_{n1} = (E_{nx1}, E_{ny1}) * |V_{n1}|$ - вектор швидкості розходження;

$E_n = (E_{nx1}, E_{ny1})$ - орт, що визначає напрямок вектора швидкості розходження;

$V_{olod} = (E_{olodx}, E_{olody}) * |V_{olod}|$ вектор відносної швидкості руху по ОЛВР;

$E_{olod} = (E_{olodx}, E_{olody})$ - орт, що визначає напрямок ОЛВР;

$V_{tg} = (V_{tgx}, V_{tgy})$ - вектор швидкості цілі, оцінюється по даним спостереження РЛС.

Із перших двох рівнянь системи (1.1) знайдено третє квадратне рівняння, рішення якого має вигляд

$$\begin{aligned}
|Volod|1)2) &= (Vtgx * Eolodx + Vtgy * Eolody) \pm \\
&\sqrt{(Vtgx * Eolodx + Vtgy * Eolody)^2 + |Vn1|^2 - |Vtg|^2}; \\
Enx1 &= \frac{Vtgx - |Volod| * Eolodx}{|Vn1|}; Eny1 = \frac{Vtgy - |Volod| * Eolody}{|Vn1|}
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Задаючи значення швидкості розходження із діапазону $Vn1 \min < |Vn1| < |Vn|$, отримано множину допустимих рішень модуля відносної швидкості $|Volod|$ та ортів вектору швидкості розходження $\mathbf{En1} = (Enx1, Eny1)$.

Маневр розходження зміною курсу є приватним випадком комбінованого маневру розходження для $|Vn1| = |Vn|$.

$$\begin{aligned}
|Volod|1)2) &= (Vtgx * Eolodx + Vtgy * Eolody) \pm \\
&\sqrt{(Vtgx * Eolodx + Vtgy * Eolody)^2 + |Vn|^2 - |Vtg|^2}; \\
Enx1 &= \frac{Vtgx - |Volod| * Eolodx}{|Vn|}; Eny1 = \frac{Vtgy - |Volod| * Eolody}{|Vn|}
\end{aligned} \tag{1.3}$$

Маневр розходження зміною швидкості є також приватним випадком комбінованого маневру розходження суден. У даному випадку вектор розходження $Vn1$ колінеарний початковому вектору Vn і знаходиться модуль вектору розходження $|Vn1|$

$$\begin{aligned}
|Volod| &= \frac{Vtgy * Enx - Vtgx * Eny}{Enx * Eolody - Eny * Eolodx}; \\
|Vn1| &= \frac{Vtgx * Eolody - Vtgy * Eolodx}{Enx * Eolody - Eny * Eolodx};
\end{aligned} \tag{1.4}$$

Параметри маневру розходження зміною курсу із усіма суднами цілями одночасно визначаються з використанням алгоритму (1.5)

$$\begin{aligned}\Delta K_j &= \arcsin \frac{\mathbf{V}_n \times \mathbf{V}_{n1}}{|\mathbf{V}_n| \cdot |\mathbf{V}_{n1}|}, j = 1..Ntg, \\ \Delta K^+ &= \max \Delta K_j, j = 1..Ntg, \\ \Delta K^- &= \min \Delta K_j, j = 1..Ntg,\end{aligned}\tag{1.5}$$

Де: ΔK_j - величина зміни курсу для розходження з j - ціллю;

ΔK^+ - величина зміни курсу вправо при розходженні з усіма цілями одночасно;

ΔK^- - величина зміни курсу вліво при розходженні з усіма цілями одночасно.

Параметри маневру розходження зміною швидкості із усіма суднами цілями одночасно визначаються з використанням алгоритму (1.6)

$$V_{n1} = \min V_{n1j}, j = 1..Ntg\tag{1.6}$$

Розрахунки за формулами (1.2) - (1.4) виконуються у бортовому обчислювачі постійно, на кожному обчислювальному такті, що дає змогу враховувати усі зміни у поведінці суден цілей та розходитися із суднами цілями, що маневрують.

Проведено математичне моделювання процесу розходження із 5 небезпечними маневруючими цілями у програмному середовищі для комп'ютерного моделювання.

Траєкторії руху цілей відносно власного судна у процесі розходження наведені на рис. 1.5.

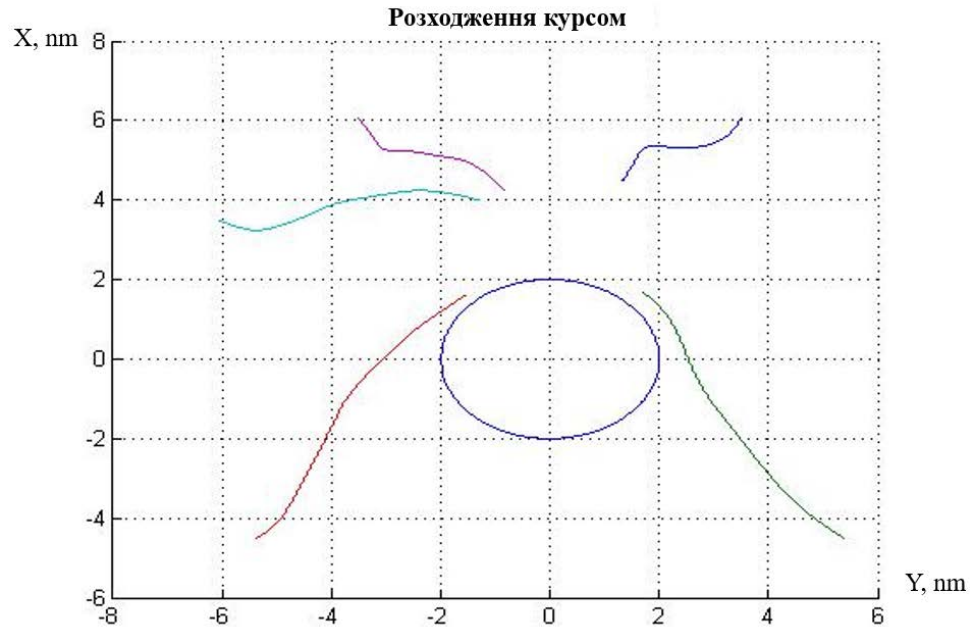


Рисунок 1.5 - Траєкторії руху цілей відносно власного судна у процесі розходження суден

У роботах [111-116] розглянуті питання розходження власного судна із багатьма небезпечними суднами-цільми, що маневрують, шляхом чисельної побудови у бортовому обчислювачі області допустимих параметрів розходження із усіма суднами-цільми одночасно, подальшому вибору із даної області оптимальних параметрів розходження, що визначаються встановленими критеріями оптимальності.

На рис. 1.6 наведена схема розходження власного судна із двома небезпечними суднами-цільми. Проте, розроблений авторами метод може використовуватися також і для розходження із будь – якою кількістю суден-цілей (обмеження на кількість суден-цілей визначаються лише можливостями ЗАРП по одночасному супроводженню суден-цілей).

Траєкторія руху власного судна у процесі розходження з двома небезпечними суднами-цільми наведена на рис. 1.6.

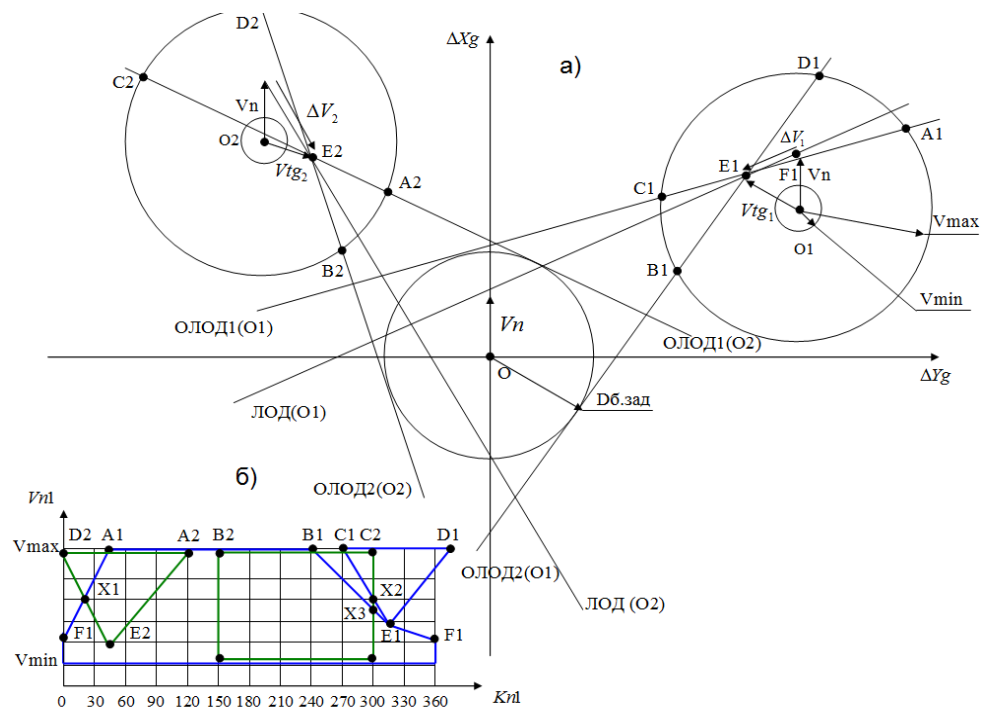


Рисунок 1.6 – Схема розходження із двома небезпечними суднами-цілями

Як видно із наведеного рисунку 1.6, вектор відносної швидкості $\Delta \mathbf{V}_1 \in \text{CHK}_1$, а вектор відносної швидкості $\Delta \mathbf{V}_2 \in \text{CHK}_2$, тобто обидві цілі є небезпечними і потрібне розходження. Змінити вектор відносної швидкості руху можливо лише за рахунок зміни вектору швидкості руху власного судна (вектор швидкості цілі не доступний для керування). Як видно з рис. 1.6,а) виконання умов $\mathbf{V}_n \in \Omega_1$ та $\mathbf{V}_n \in \Omega_2$ дозволяє одночасно розійтися з двома небезпечними цілями, де Ω_1 - область допустимих значень вектору швидкості власного судна, що лежить між колами радіусом V_{\max}, V_{\min} , за винятком CHK_1 , а Ω_2 - область допустимих значень вектору швидкості власного судна, що лежить між колами радіусом V_{\max}, V_{\min} , за винятком CHK_2 . На рис. 1.6,б) ці області зображено також і в декартовій системі координат.

Для побудови області $\Omega_j, j=1..N_{\text{tg}}$ допустимих значень векторів розходження беруться пробні вектори розходження $\overline{V}_T = (V_T \cos K_T, V_T \sin K_T)$ у вузлах сітки області можливих змін вектору швидкості. Для кожного

пробного вектору розраховується пробний вектор відносного руху із кожною ціллю $\Delta V_{Tj} = \mathbf{V}tgj - \mathbf{V}_T$, який перевіряється на приналежність CHK_j .

$$(\Delta \mathbf{V}_{Tj} \times \mathbf{E}olod_{1j} \ \& \ \Delta \mathbf{V}_{Tj} \times \mathbf{E}olod_{2j}) < 0 \quad (1.7)$$

Якщо умова (1.7) не виконується, пробний вектор \mathbf{V}_T належить області Ω_j допустимих значень векторів розходження із j - ціллю. Область допустимих значень векторів розходження із усіма цілями одночасно знаходиться об'єднанням областей Ω_j

$$\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_{Ntg} \quad (1.8)$$

Наедені результати математичного моделювання процесів розходження із п'ятьма небезпечними цілями, що маневрують, на стенді імітаційного моделювання.

На рис. 1.7 зображені області допустимих параметрів розходження суден, отримані у процесі проведення експерименту.

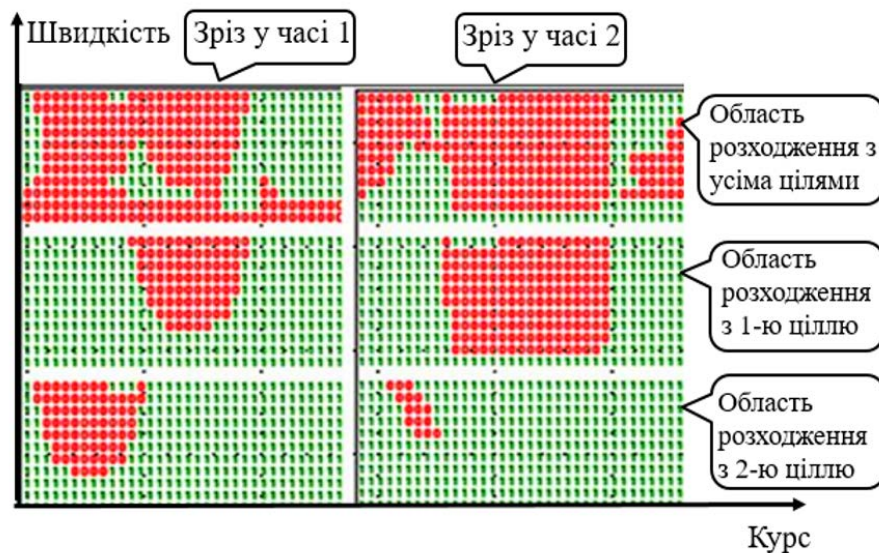


Рисунок 1.7 – Области допустимих параметрів розходження суден

На рис. 1.8 зображені траєкторії руху власного судна і суден-цілей під час розходження.

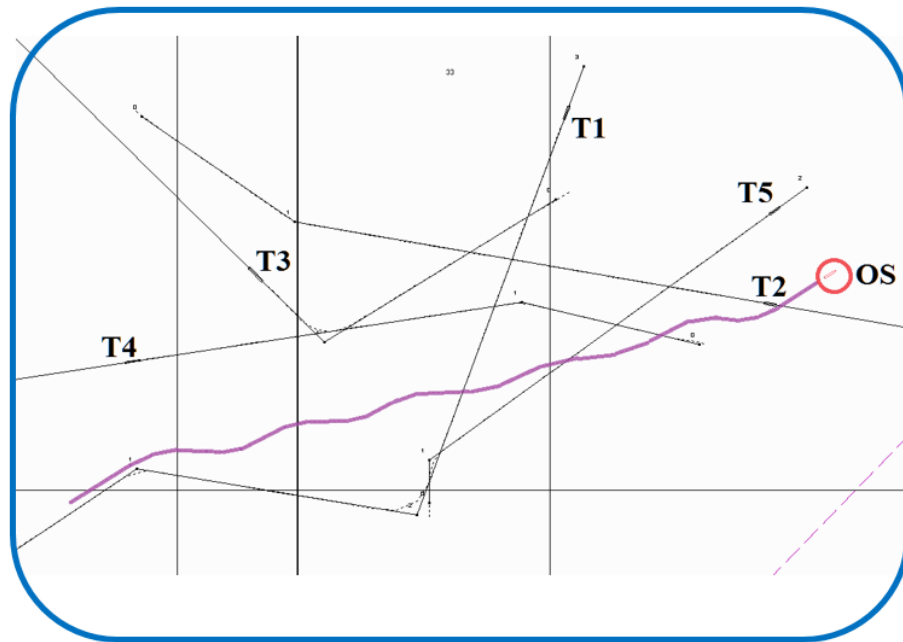


Рисунок 1.8 – Траєкторії руху власного судна і суден-цілей під час розходження.

1.5. Висновки по розділу 1

1. У розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку моделей та методів підвищення безпеки судноплавства, приведена статистика аварій на морському транспорті, проаналізовані причини аварій та встановлено, що людський чинник є найслабшою ланкою в автоматизованих системах керування рухом суден. На підставі вивчення та систематизації матеріалів з відкритих джерел щодо підвищення безпеки судноводіння, сформульовано завдання, вимоги та концептуальну модель АСК рухом судна, визначено її структурний склад.

2. У бортових та наземних автоматизованих системах керування рухом сучасних суден використовується навігаційне обладнання ECDIS, AIS (ЗНО), IBS/INS, ARPA, LRIT, VTS, GMDSS, функції якого частково дублюються і яке на сьогоднішній день не складає єдину цілісну навігаційну систему. Для усунення цих недоліків ІМО планує розробку системи

електронної навігації e-navigation, яка може допомогти зменшити кількість аварій, помилок та збоїв шляхом розробки стандартів точної та рентабельної системи.

3. Наявність e-navigation дозволить також проводити планування маршруту, контроль руху судна по маршруту та при розходженні із іншими суднами із врахуванням інтересів усіх учасників операції. У зв'язку із цим актуальною необхідністю є розробка принципів керування, які б забезпечили мінімізацію ризиків для усіх учасників операції та подальше підвищення, за рахунок цього, безпеки судноплавства.

4. Сучасне навігаційне обладнання ECDIS суттєво спрощує роботи по навігаційній підготовці судна до виконання рейсового завдання, включаючи підбір картографічної, навігаційної, гідрографічної, довідкової та іншої інформації, попередню прокладку та перевірку маршруту руху судна. Разом з тим, для проведення попередньої прокладки, ECDIS надає судноводієві лише зручний інтерфейс, проте сама попередня прокладка виконується, як і раніше, вручну, що не дозволяє оптимізувати маршрут руху судна на основі оцінки ризиків і підвищити безпеку судноводіння. У зв'язку з цим потрібно: розробити метод планування маршруту, який дозволив би побудувати оптимальний маршрут при збереженні заданого ризику зіткнення при русі по маршруту; використовувати метод градієнта для задачі планування маршруту руху судна; провести математичне моделювання процесів планування маршруту руху судна у полі ризиків.

5. Існуючі методи вирішення задачі оптимального та безпечного розходження судна при русі по маршруту базуються на критерії абсолютної безпеки. Проте, зіткнення суден трапляються, і «абсолютно» безпечна траєкторія руху судна при виконанні маневру розходження, містить імовірність зіткнення. Зважаючи на це, раціональніше будувати такі траєкторії руху при розходженні суден, на яких забезпечується задана імовірність зіткнення. Основною перевагою такого підходу є врахування розподілу ризиків поблизу цілей та можливість оптимізації процесів

розходження для заданого ризику. Враховуючи вищесказане, потрібно: розробити метод спільного розходження суден у полі ризиків, який дозволив би оптимізувати операції розходження; адаптувати метод градієнта для вирішення задач розходження суден; провести математичне моделювання процесів розходження при русі судна по маршруту.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ

Як зазначалося раніше у розділі 1, одним із найбільш перспективних напрямків розвитку систем керування рухом суден у найближчі 10-20 років, до появи повністю автономних суден та систем, будуть автоматизовані системи керування із автоматичними модулями, які здатні кардинальним чином зменшити вплив «людського чиннику» на процеси керування рухом суден та зменшити кількість аварій і катастроф на морі. Створення автоматизованих систем з автоматичними модулями керування та у подальшому автономних систем можливе лише за умови використання бортових обчислювачів, які здатні не тільки вирішувати традиційні задачі по керуванню рухом судна, але й більш складні, і при тому вирішувати їх оптимально, з використанням останніх досягнень математики та теорії автоматичного керування. Збільшення кількості суден та інтенсивності їх руху вимагає також розробки та впровадження нових підходів, принципів і методів, які сьогодні, за умови ручного керування, не можуть бути реалізовані. Наприклад, у роботах Lisowski [89, 90] розглянуто застосування моделі багатокрокової матричної гри для синтезу оптимального маневрування суден, у роботах Lisowski [91-98] представлено застосування обраних методів теорії оптимального та ігрового керування рухом суден для визначення безпечної траєкторії власного судна при проходженні повз інших суден-цілей, у роботах Lisowski [99-106] розглянуто застосування обраних методів теорії ігор для автоматизації процесів керування рухом морських об'єктів, у роботі [110] розглянуті питання комбінованого розрахунку (аналітичного та з використанням числових методів) параметрів розходження судна із багатьма суднами-цілями, що маневрують у бортовому обчислювачі, у роботах [111-113] розглянуті питання розходження судна із багатьма суднами-цілями, що маневрують шляхом чисельної побудови у бортовому обчислювачі області допустимих параметрів розходження судна із усіма суднами-цілями одночасно, подальшому виборі із даної області оптимальних

параметрів розходження, що визначаються встановленими критеріями оптимальності, тощо.

Існуючі методи запобігання зіткненню суден передбачають застосування маневру зміни курсу або швидкості власного судна, та зміну, за рахунок цього маневру, відносної швидкості судна і суден-цілей, що знаходяться у зоні небезпечного зближення. Більш ефективний метод запобігання зіткненню суден полягає у визначенні таких параметрів розходження, які оптимізують вибрану цільову функцію для усіх учасників операції одночасно [104, 105, 117, 118]. Однак, існує значна невизначеність, що пов'язана із поведінкою суден-цілей у процесі розходження. Зниження невизначеності може бути досягнуто, якщо дії власного судна будуть відповідати діям інших суден-цілей, що приймають участь в операції. Задача проста, але вимагає застосування методів оптимального керування рухом за умови оптимізації цільового вектор-функціоналу. Це складна задача, методи вирішення якої мало вивчені, але її вирішення дозволяє побудувати оптимальну стратегію розходження суден при русі по маршруту.

2.1. Теоретичні основи спільного розходження суден в умовах невизначеності

Задача оптимальної прокладки курсу насамперед вимагає визначення критерію оптимальності або цільової функції. У якості такої функції може бути вибраний ризик зіткнення $C(\mathbf{x})$, а вирішення оптимізаційної задачі полягає у мінімізації даного ризику $C(\mathbf{x})$ на траєкторії руху судна [28, 29, 119, 120]. Погодні умови та інші перешкоди, що ускладнюють судноплавство, об'єднуються в обмеження типу рівностей $\varphi_i(\mathbf{x}) = 0$, $i = 1, \dots, m_1$ і обмеження типу нерівностей $\varphi_i(\mathbf{x}) < 0$, $i = 1, \dots, m_2$. У простому випадку судноплавства задача приймає вид задачі Лагранжа [121-123]

$$\mathbf{x}^* \rightarrow \min S(\mathbf{x}),$$

Де: $S(\mathbf{x})$ - довільна цільова функція

$$\begin{aligned}\varphi_i(\mathbf{x}) &= 0, \quad i = 1..m_1 \\ \varphi_i(\mathbf{x}) &< 0, \quad i = 1..m_2\end{aligned}\quad (2.1)$$

Де: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - вектор стану та та компоненти вектору стану системи;

Відома методика вирішення цієї задачі передбачає формування функції Лагранжа $L(\mathbf{x}, \lambda)$, градієнт якої на \mathbf{x}^* наближається до нуля

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial x_j} &= 0; \\ L(\mathbf{x}, \lambda) &= \lambda_0 S(\mathbf{x}) - \lambda_1 \varphi_1(\mathbf{x}) - \lambda_2 \varphi_2(\mathbf{x}), \quad \text{grad}L = 0, \rightarrow \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = 0 \\ \lambda_2 \varphi_2(\mathbf{x}) &= 0.\end{aligned}\quad (2.2)$$

Умова (2.2) відома як теорема Кунни-Таккера [124, 125], визначає точку оптимуму як точку стаціонарну по координаті при виконанні обмежень типу рівності і нечутливості цільової функції до обмежень типу нерівності. У цій простій, але важливій задачі простежимо сенс множників Лагранжа λ

$$\text{grad}L(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \rightarrow \frac{\partial S}{\partial x_j} = \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \rightarrow \lambda = \frac{\partial S}{\partial \varphi_j}\quad (2.3)$$

Вираз (2.3) ілюструє важливий факт - множник Лагранжа - це чутливість цільової функції до обмежень. У задачі побудови оптимального маршруту умова (2.3) відіграє важливу роль.

Вирішення спільної задачі розходження n суден відрізняється від традиційної задачі розходження з n суднами тим, що траєкторія розходження прокладається з урахуванням оптимальності рішення для усіх учасників операції. Так, для n учасників операції існує n функцій цілі і

маршрут потрібно прокладати таким чином, щоб усі цільові функції досягали екстремуму

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_n(\mathbf{x}) \end{array} \right\} \rightarrow \mathbf{S}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} S_1(\mathbf{x}) \\ S_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ S_n(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Для найпростішої задачі безумовної оптимізації цільової вектор-функції $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ ставиться задача $\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{S}(\mathbf{x})$, тоді

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_n(\mathbf{x}) \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{dS_1(\mathbf{x}^*)}{dx_j} = 0 \\ \frac{dS_2(\mathbf{x}^*)}{dx_j} = 0 \\ \vdots \\ \frac{dS_n(\mathbf{x}^*)}{dx_j} = 0 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Умова (2.5) виконується тільки у разі збігу точки екстремуму для всіх компонент цільової вектор-функції, а отже, в ε -околиці точки \mathbf{x}^* компоненти цільової вектор-функції не виразні і задача вироджена. У цьому випадку виникають обмеження на значення компонент цільової вектор-функції у точці екстремуму

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_n(\mathbf{x}) \end{array} \right\}; \quad (2.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_1(\mathbf{x}) - a_1 = 0 \\ S_2(\mathbf{x}) - a_2 = 0 \\ \vdots \\ S_n(\mathbf{x}) - a_n = 0 \end{array} \right\}.$$

Із врахуванням (2.6.), отримуємо умову оптимальності (2.3) у вигляді

$$\frac{ds}{dx_j} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{nm} \end{pmatrix} \frac{d(\mathbf{s} - \mathbf{a})}{dx_j} \quad (2.7)$$

Як видно із векторного рівняння (2.7), матриця множників Лагранжа у цьому випадку повинна бути одиничною.

$$\mathbf{a} = const \rightarrow \frac{d(\mathbf{s} - \mathbf{a})}{dx_j} = \frac{ds}{dx_j} \rightarrow \frac{ds}{dx_j} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \frac{ds}{dx_j} \quad (2.8)$$

З огляду на зміст множника Лагранжа (2.3), можемо записати умову оптимальності в задачі (2.4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_i}{\partial S_j} &= 0; \quad i = 1..m; \quad j = 1..m \quad i \neq j; \\ i = j &\rightarrow \frac{\partial S_i}{\partial S_j} = 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Умова (2.9) вказує на те, що оптимальне рішення не погіршує жодне із рішень, тобто, компоненти цільового вектора незалежні і їх стани не впливають один до одного. Це рішення відоме як критерій Парето або як ефективне рішення по Джефрріону [126-128]. При залежності компонентів цільового вектору від декількох змінних, задача стає більш громіздкою, так як у цьому випадку похідна компонента цільового вектору по вектору стану перетворюється в матрицю і як наслідок матриця множників Лагранжа стає клітинною, таким чином, у задачі з розмірністю цільового вектора, що дорівнює розмірності простору стану, маємо:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^* \rightarrow \min S_n(\mathbf{x}) \end{array} \right\}, \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{array}{l} S_1(\mathbf{x}) - a_1 = 0 \\ S_2(\mathbf{x}) - a_2 = 0 \\ \vdots \\ S_n(\mathbf{x}) - a_n = 0 \end{array} \right\}$$

Умова оптимальності (2.3) у вигляді (2.10) приймає більш складну форму з клітинною матрицею множників

$$\frac{d\mathbf{s}}{dx_j} = \left(\begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{ccc} \lambda_{11}^{11} & \cdot & \lambda_{1n}^{11} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{11} & \cdot & \lambda_{nn}^{11} \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{ccc} \lambda_{11}^{1n} & \cdot & \lambda_{1n}^{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{1n} & \cdot & \lambda_{nn}^{1n} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{ccc} \lambda_{11}^{n1} & \cdot & \lambda_{1n}^{n1} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{n1} & \cdot & \lambda_{nn}^{n1} \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{ccc} \lambda_{11}^{nn} & \cdot & \lambda_{1n}^{nn} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{nn} & \cdot & \lambda_{nn}^{nn} \end{array} \right) \end{array} \right) \frac{d(\mathbf{s} - \mathbf{a})}{dx_j} \quad (2.11)$$

При нерівності розмірностей вектора цілі і вектора стану маємо справу з неквадратними матрицями, але при цьому зберігаються вимоги оптимальності - взаємна нечутливість у точці екстремуму між компонентами цільової вектор-функції.

2.2. Теоретичні основи планування маршруту із врахуванням інтересів усіх учасників операції в умовах невизначеності

Задача побудови оптимальної траєкторії має на увазі оптимальність уздовж всієї траєкторії, тому компонентом цільової вектор-функції буде не функція а функціонал, інтегрант якого являє собою вектор ризиків \mathbf{C} , що

залежить від вектору стану \mathbf{x} усієї системи та векторів керування \mathbf{u}_j кожного учасника операції

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^{t_1} C_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}_1) dt \\ \int_{t_0}^{t_1} C_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}_2) dt \\ \vdots \\ \int_{t_0}^{t_1} C_m(\mathbf{x}, \mathbf{u}_m) dt \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

З огляду на специфіку прокладки курсу припустимо, що першим компонентом цільового вектор-функціоналу буде цільовий функціонал власного судна. Важливою особливістю задачі є те, що всі компоненти цільового вектор-функціоналу опуклі по визначенню, так як використовуються для мінімізації очікуваних витрат. Також припустимо, що усі судна мають однаковий тип математичної моделі – лінеаризовану математичну модель, та відрізняються один від одного матрицями об'єкту \mathbf{A}_i та матрицями керування \mathbf{B}_i . У загальному випадку ці обмеження мають вигляд $d\mathbf{x}/dt - \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$.

На рис. 2.1 приведена структурна схема керування з цільовим вектор-функціоналом

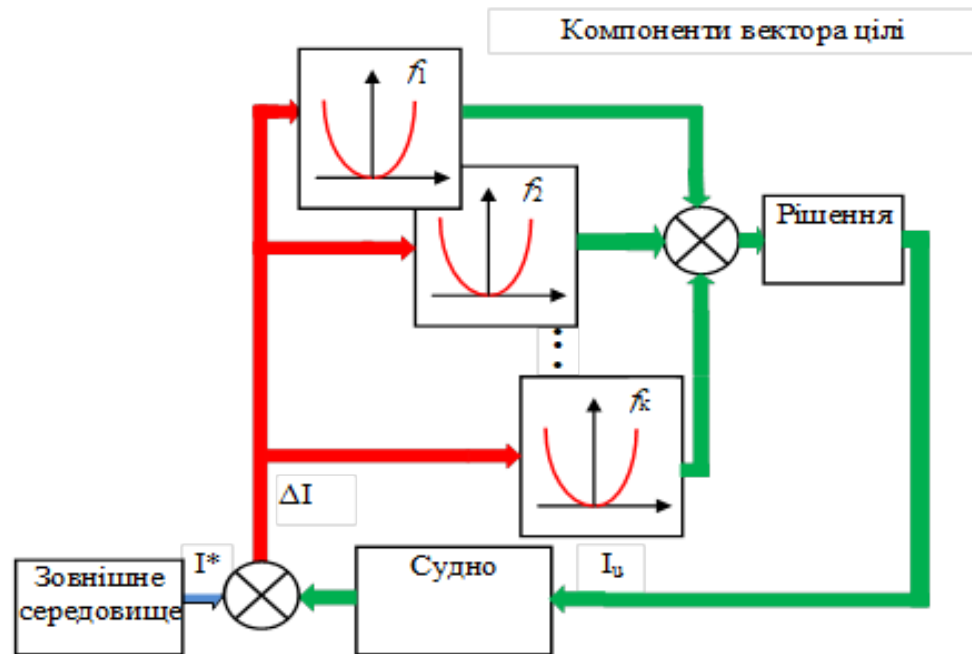


Рисунок 2.1 - Структурна схема керування з цільовим вектор-функціоналом

Рішення одновимірної задачі оптимального керування повністю керованою динамічною системою з опуклим функціоналом розглянуті у роботах [129-134]. Цільовий функціонал, обмеження у вигляді математичної моделі та граничні умови запишемо у формі Коші (2.13)

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t^*) &\rightarrow \text{extr} \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt; \\
 \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) &= \mathbf{0}; \\
 \left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x} \\ \mathbf{x}(t_1) &= \mathbf{x}_1 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Для вирішення даної оптимізаційної задачі використовуємо функціонал Лагранжа

$$\tilde{L} = \int_{t_0}^{t_1} \left[f_0 \lambda_0 + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{f} - \boldsymbol{\lambda}^T \dot{\mathbf{x}} \right] dt = \int_{t_0}^{t_1} L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, t) dt \tag{2.14}$$

Так як інтегрант цільової функції опуклий і обмеження керовані, то виконуються умови Кунни - Таккера для інтегранта функціоналу Лагранжа

$$L(\mathbf{x}^*, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, \lambda) \leq L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, \lambda) \leq L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, \lambda^*) \quad (2.15)$$

Виділимо функцію Гамільтона в функції Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, \lambda) = H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \lambda) - (\lambda^*)^T \dot{\mathbf{x}} \quad (2.16)$$

Виразимо керування через множник Лагранжа $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\lambda)$ і, розглядаючи керування як самостійну змінну, отримуємо

$$H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}) - \lambda^{*T} \dot{\mathbf{x}} \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) - \lambda^{*T} \dot{\mathbf{x}} \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) - \lambda^* \quad (2.17)$$

Після спрощення, отримуємо умову Кунни - Таккера для функції Гамільтона в задачі з опуклим цільовим функціоналом і керованими обмеженнями

$$H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u})|_{\lambda^*} \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)|_{\lambda^*} \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*)|_{\lambda^*} \quad (2.18)$$

Нерівність (2.18) розпадається на дві умови

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^*|_{\lambda^*} &\rightarrow \min H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*) \\ \mathbf{u}^*|_{\lambda^*} &\rightarrow \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Перша нерівність системи породжує принцип Беллмана, а друга нерівність породжує принцип максимуму Понтрягіна [135].

У розглянутій задачі врахуємо обмеження, що пов'язані з динамікою судна

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^{t_1} C_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}_1) dt \\ \int_{t_0}^{t_1} C_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}_2) dt \\ \vdots \\ \int_{t_0}^{t_1} f C_m(\mathbf{x}, \mathbf{u}_{m1}) dt \end{bmatrix} = \int_t \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt; \quad \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} - A_1 \mathbf{x} - B_1 \mathbf{u}_1 \\ \dot{\mathbf{x}} - A_2 \mathbf{x} - B_2 \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{x}} - A_m \mathbf{x} - B_m \mathbf{u}_m \end{bmatrix} = \mathbf{0}; \quad (2.20)$$

Тоді, після доповнення обмежень умовою оптимальності (2.5), вектор-функція Гамільтона у даній задачі матиме вигляд

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \lambda_0 \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \lambda (\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \dot{\mathbf{x}}) - \lambda \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2.21)$$

Якщо λ_0 можна вважати рівним одиниці, то Λ - це клітинна матриця, аналогічна матриці в рівнянні (2.11). Припустимо стаціонарність задачі, що дозволяє використовувати принцип максимуму. Тоді умова оптимальності прийме вигляд

$$\mathbf{u}^* \Big|_{\substack{\mathbf{x}^* \\ \lambda^*}} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x_j} = + \frac{d\lambda}{dt} \\ \max \mathbf{H}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}) \\ \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{u}_j} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (2.22)$$

Так як шукаємо сильний екстремум стаціонарної задачі, то згідно з принципом максимуму, функція Гамільтона постійна на оптимальній траєкторії. Тоді, якщо матриця множників Лагранжа одинична $\Lambda = \mathbf{1}$, умова оптимальності (2.22) виконується.

Таким чином, за умови опуклості інтегрантів усіх компонентів вектора цільового функціоналу, рішення задачі має вигляд

$$\lambda = \left(\begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{cc} \lambda_{11}^{11} & \lambda_{1n}^{11} \\ \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{11} & \lambda_{nn}^{11} \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{cc} \lambda_{11}^{1n} & \lambda_{1n}^{1n} \\ \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{1n} & \lambda_{nn}^{1n} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{cc} \lambda_{11}^{n1} & \lambda_{1n}^{n1} \\ \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{n1} & \lambda_{nn}^{n1} \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{cc} \lambda_{11}^{nn} & \lambda_{1n}^{nn} \\ \cdot & \cdot \\ \lambda_{n1}^{nn} & \lambda_{nn}^{nn} \end{array} \right) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{cc} 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 1 \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{cc} 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 1 \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{cc} 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 1 \end{array} \right) & \cdots & \left(\begin{array}{cc} 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 1 \end{array} \right) \end{array} \right) = I; \quad (2.23)$$

Більш просте формулювання оптимальності полягає у відсутності взаємної чутливості за цільовими функціями

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial C_j} &= 0; \quad i = 1..m, j = 1..m, i \neq j; \\ \frac{\partial C_i}{\partial C_i} &= 1; \quad i = 1..m. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Отже, незважаючи на складність, розглянута задача має глобальне оптимальне рішення, що визначається умовою (2.24). Ця умова означає, що при прокладці курсу відстань розходження «*i*-го» і «*j*-го» судна повинна завжди забезпечувати збереження заданого ризику обох суден, тобто еліпс заданого ризику власного судна не повинен перетинати еліпс заданого ризику судна-цілі.

Таким чином, прокладання маршруту та розходження суден при русі по маршруту, виконується за критерієм мінімуму витрат за умови оптимальності (2.24). Така постановка задачі вигідна з точки зору прогнозу дій власного судна і суден-цілей, так як у цьому випадку оптимуму досягає кожен із учасників операції і, припускаючи опуклість інтегрантів, ми практично припускаємо розумність дій оператора-судноводія.

2.3 Функціонал рівня небезпеки

Поле ризиків - це сукупність сумарних ризиків від навігаційних небезпек $C_n(\mathbf{x})$, власного ризику $C_o(x)$, ризиків інших суден - цілей $C_i(x)$, що беруть участь в операції.

$$C(\mathbf{x}) = C_o(\mathbf{x}) + C_n(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n C_i(\mathbf{x}) \quad (2.25)$$

Математичне очікування сумарного ризику (2.25) визначається за наступною формулою

$$M\{C(\mathbf{x})\} = M\left\{C_o(\mathbf{x}) + C(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n C_i(\alpha) + \sum_{i=1}^n C_i(\mathbf{x})\right\} \quad (2.26)$$

Сумарні ризики залежать від невизначеності характеристик власного судна і суден цілей, наявності інструментальних похибок вимірювання параметрів взаємного руху судна і суден цілей, невизначеності поведінки суден цілей, вартості судна і вантажу. Сумарний ризик має нормальний закону розподілу імовірності втрат і може бути представлений у вигляді

$$C_i(\mathbf{x}) = \frac{C_m}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2-2r_{xy}} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x^2\sigma_y^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]}, i = 0..n, \quad (2.27)$$

Де: σ_x, σ_y - сумарні середньоквадратичні похибки зазначених вище невизначеностей вздовж осей зв'язаної із судном системи координат;

r_{xy} - коефіцієнт кореляції сумарних середньоквадратичних похибок;

C_m - коефіцієнт вартості судна і вантажу у розподілі сумарного ризику;

x_0, y_0 - координати математичного очікування розподілу $M\{C(\mathbf{x})\}$;

x, y - координати довільної точки у полі операцій.

Сумарні середньоквадратичні похибки не корельованих невизначеностей знаходимо за формулами

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2 + \dots + \sigma_{xn}^2}, \\ \sigma_y = \sqrt{\sigma_{y1}^2 + \sigma_{y2}^2 + \dots + \sigma_{yn}^2}, \end{cases} \quad (2.28)$$

Де: $\sigma_{xj}, \sigma_{yj}, j = 1..n$ - середньоквадратичні похибки зазначених вище невизначеностей.

Сумарні середньоквадратичні похибки корельованих невизначеностей знаходимо за формулами

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \dots + \sigma_{xn} \\ \sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \dots + \sigma_{yn} \end{cases} \quad (2.29)$$

Для заданого ризику C^* , із виразу (2.27) отримаємо

$$\frac{2\pi\sigma_x\sigma_y C^*}{C_m} = e^{-\frac{1}{2-2r_{xy}} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x^2\sigma_y^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (2.30)$$

Після логарифмування, вираз (2.30) прийме вигляд

$$-\frac{1}{2-2r_{xy}} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x^2\sigma_y^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right] = \frac{2\pi\sigma_x\sigma_y C^*}{C_m},$$

або

$$\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x^2\sigma_y^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} = \frac{-4(1-r_{xy})\pi\sigma_x\sigma_y C^*}{C_m},$$

$$\begin{cases} \frac{(x-x_0)^2}{(\sigma_x R)^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{(\sigma_x \sigma_y R)^2} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y R)^2} = 1 \\ R^2 = \frac{-4(1-r_{xy})\pi\sigma_x \sigma_y C^*}{C_m} \end{cases} \quad (2.31)$$

Перше рівняння системи (2.31) представляє собою еліпс, зміщений відносно початку базової (географічної) системи координат на величину x_0, y_0 та повернутий на деякий кут (див рис.2.2). Кут повороту еліпса пов'язаний із коефіцієнтом кореляції r_{xy} . Сумарні середньоквадратичні похибки σ_x, σ_y та приведений радіус R , який пропорційний заданому ризику C^* , визначають піввісі еліпсу. Із системи (2.31) видно, що чим більший заданий ризик C^* , тим менші піввісі еліпсу.

На рис. 2.2 наведені еліпси рівних ризиків навколо власного судна та суден цілей

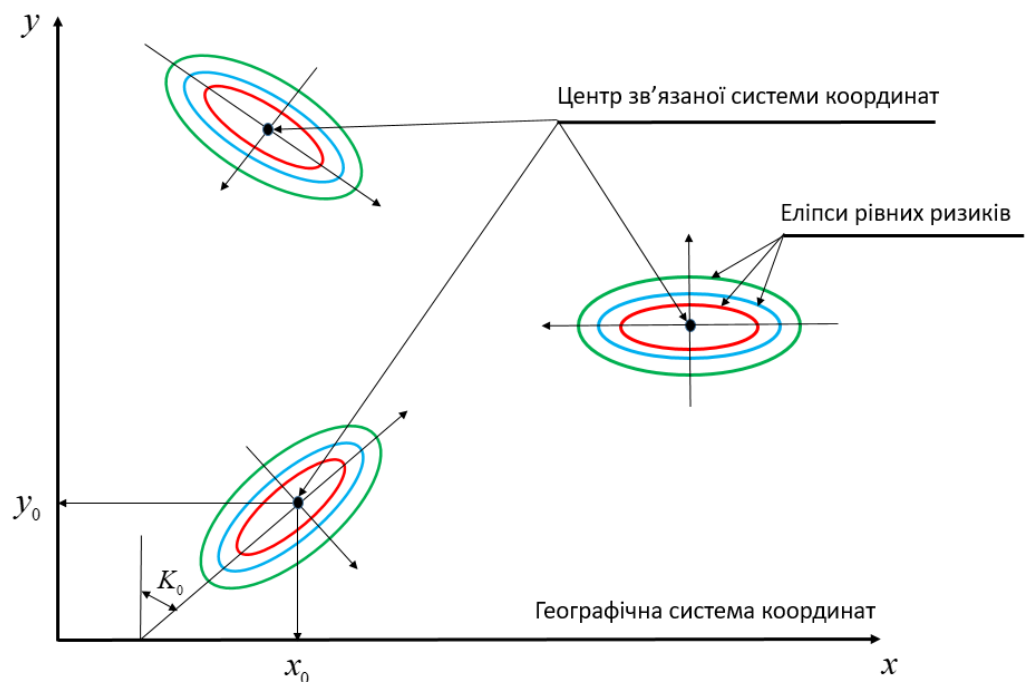


Рисунок 2.2 – Еліпси рівних ризиків власного судна і суден цілей

На рис. 2.3 наведена функція миттєвого ризику і лінії рівня. Гладкість даної функції надає можливість використання градієнтних процедур при побудові керувань.

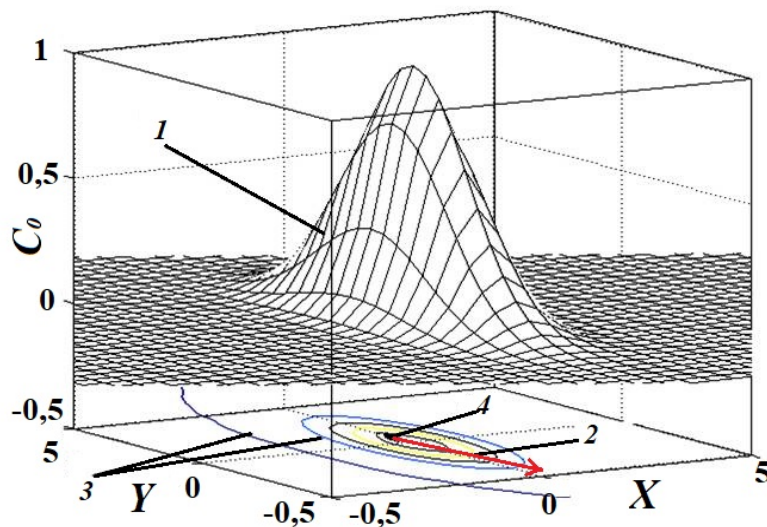


Рисунок 2.3 - Функція миттєвого ризику і лінії рівня ризику

Для опису сцени з урахуванням невизначеності за глибинами, у поле ризику вводиться функція глибин, що дозволяє враховувати ризик за глибинами при прокладанні маршруту руху судна (рис. 2.4а).

Завдяки адитивності структури поля ризиків формується модель для декількох суден що рухаються на фарватері (рис. 2.4б).

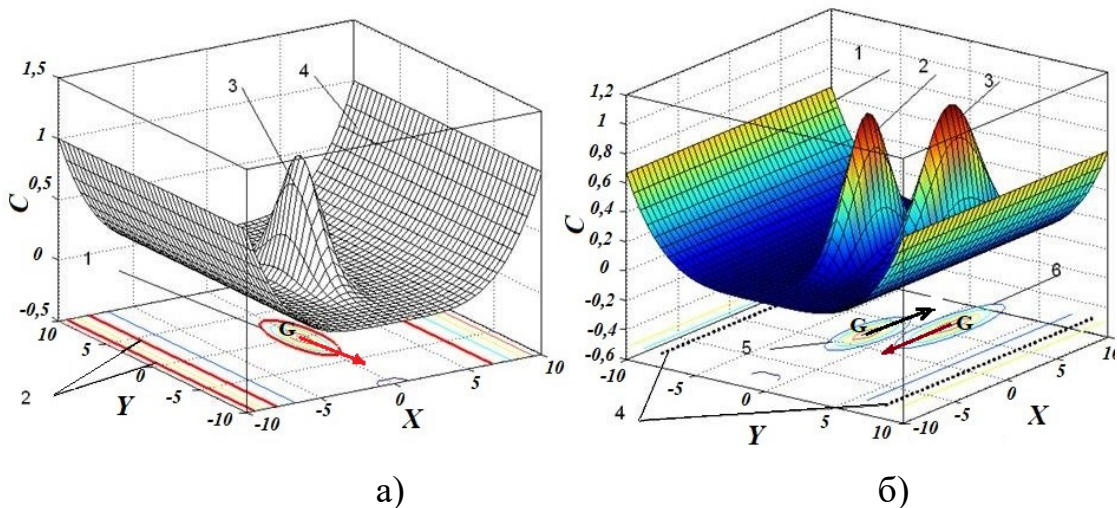


Рисунок 2.4 - Поле ризиків із врахуванням глибин фарватеру

Подання сцени як поля ризиків дозволяє формувати зручний інтерфейс для судноводія, де легко сприймаються як позиції і траєкторії руху суден цілей, так і їх розміри та небезпека, яку вони являють (рис.2.5)

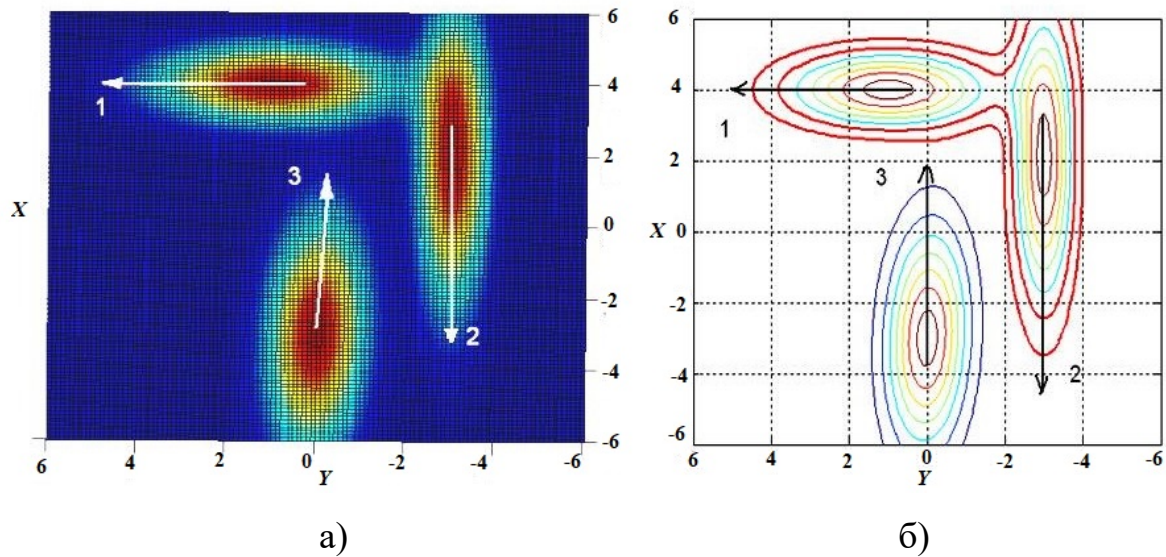


Рисунок 2.5 - Поле ризиків і лінії рівня ризику

Необхідно враховувати, що метод поля ризиків орієнтований насамперед на автоматичну систему обчислення у бортовому контролері.

2.4. Еталон функції рівня небезпеки

Припустимо, що для кожної цілі, яка бере участь в операції розходження, нам відомо її швидкість, курс, максимальний ризик і дисперсії по осях розподілу ризиків. Власне ці п'ять значень дозволяють оцінити ціль. Але, розраховувати для кожної цілі її поле ризиків досить складно, тому розрахуємо спочатку еталонне поле розподілу ризиків, однакове для всіх завдань, рис. 2.6.

На рисунку 2.6 наведена Еталонна функції рівня небезпеки зіткнення (еталонне поле ризику).

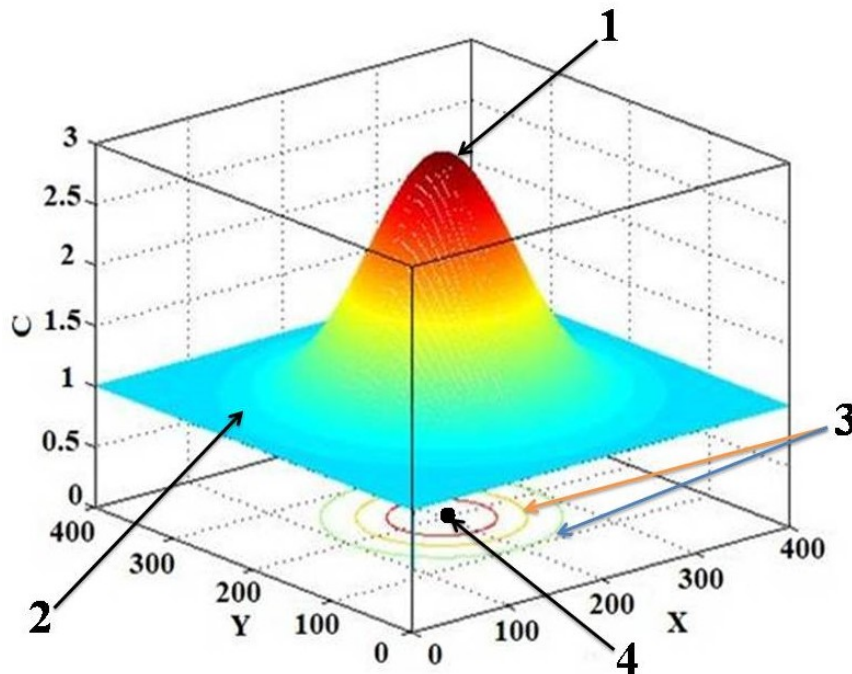


Рисунок 2.6 – Еталонна функції рівня небезпеки зіткнення

1 – близька зона, ризик зіткнення великий; 2 – далека зона, ризик зіткнення мінімальний; 3 – еліпси рівних ризиків зіткнення; координати центру ваги судна.

Для отримання поля ризику, пов'язаного з певним судном, потрібно виконати афінне перетворення еталонного поля ризику. Для цього введемо курсовий кут цілі φ , середньоквадратичні відхилення положення цілі по осях σ_x σ_y і максимальний ризик C_m . Ці дані дозволяють побудувати миттєве поле ризику для даної цілі з використанням афінного перетворення, рис. 2.6

$$\mathbf{x} = C_m \mathbf{A} \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_0 \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = C_m \begin{pmatrix} \frac{\cos \varphi}{\sigma_x} & \sin \varphi \\ \cos \varphi & -\frac{\sin \varphi}{\sigma_y} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

де вектор координат $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0)$ визначає положення судна цілі у полі ризиків операції розходження. Таким чином миттєве поле ризику для i -ї цілі визначається перетворенням (2.30) еталонного поля ризику, рис.2.6

$$C_i(\mathbf{x}) = C_m f \left(\left(\begin{array}{cc} \frac{\cos \varphi}{\sigma_x} & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \frac{\cos \varphi}{\sigma_y} \end{array} \right) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right) \quad (2.31)$$

Ця швидка операція перетворення координат дозволяє отримати поля ризиків суден цілей, рис. 2.7,а. Для отримання всього поля ризиків операції розходження виконується просте додавання полів ризиків суден цілей, рис. 2.7,б.

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n C_i(\mathbf{x}) \quad (2.32)$$

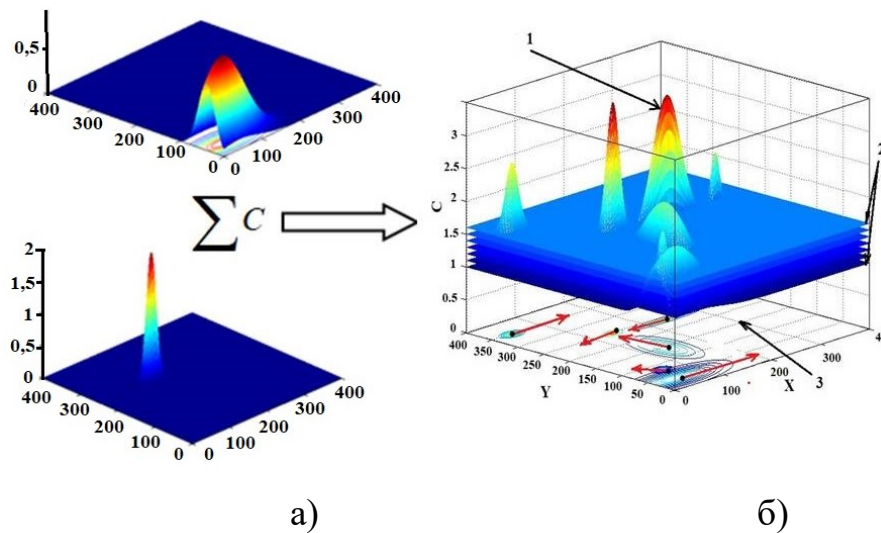


Рисунок 2.7 - Формування поля ризиків розходження суден

2.5. Висновки по розділу 2

Збільшення кількості суден та інтенсивності їх руху вимагає розробки та впровадження нових підходів, принципів і методів, які сьогодні, за умови ручного керування, не можуть бути реалізовані. У розділі 2 розглянуто нові принципи та методи підвищення безпеки судноплавства, які можуть бути реалізовані у бортовому обчислювачі системи автоматизованого керування рухом суден при русі по маршруту та при виконанні маневру розходження.

1. Розглянуто новий принцип підвищення безпеки судноплавства, який полягає у врахуванні, при плануванні маршруту, русі судна по маршруту та під час розходження з суднами-цілями, інтересів усіх учасників операції, що дозволяє зменшити ризики зіткнення суден та підвищити безпеку судноплавства.

2. Отримані умови реалізації принципу врахування інтересів усіх учасників операції, що полягають у отриманні такого оптимального рішення, яке не погіршує жодне із рішень решти учасників, тобто, компоненти цільового вектора незалежні і їх стани не впливають один до одного.

3. Показано, що умови врахування інтересів усіх учасників операції можуть бути реалізовані у полі ризиків.

4. Розроблено метод побудови поля ризиків власного судна та суден-цілей, який полягає у використанні у якості судового домену сумарного розподілу ризиків навколо власного судна та суден-цілей, врахуванні похибок вимірювання, обчислення, інших невизначених факторів, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку судноплавства.

5. Розроблено метод побудови сумарного поля ризиків, який полягає у накладанні полів ризиків власного судна, суден-цілей, полів ризиків інших навігаційних небезпек, що дозволяє отримати аналітичний вираз поля ризиків, ліній рівня поля ризиків з метою візуалізації та подальшої числової обробки у бортовому обчислювачі системи автоматизованого керування рухом судна.

6. Досліджена можливість використання градієнтних методів для роботи з полем ризиків, яка полягає у отриманні оптимальних рішень у задачах планування маршруту, контролю руху судна по маршруту та розходження з суднами-цілями, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку судноплавства.

РОЗДІЛ 3. ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ РУХУ СУДНА З УРАХУВАННЯМ РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ

У попередньому розділі розглянуті теоретичні основи планування маршруту руху судна із врахуванням інтересів усіх учасників операції. Вирішення таких задач відрізняється від традиційної задачі планування маршруту тим, що запланована траєкторія руху прокладається з урахуванням оптимальності рішення для усіх учасників операції. Так, для n учасників операції існує n цільових функціоналів і маршрут руху потрібно прокласти таким чином, щоб усі цільові функціонали досягали екстремуму. Знайдена умова планування маршруту руху судна із врахуванням інтересів усіх учасників операції, згідно якої оптимальне рішення не повинно погіршувати жодне із рішень для інших суден-цілей, тобто, компоненти цільового вектор-функціоналу незалежні і їх стани не повинні впливати один на одного. Це рішення відоме як критерій Парето або як ефективне рішення по Джефферіону [127]. Показано, що задачу планування маршруту руху судна зручно вирішувати у полі ризиків, а у якості інтегранту цільового вектор-функціоналу взяти вектор ризиків власного судна і суден цілей. У цьому випадку отримана умова планування маршруту руху судна із врахуванням інтересів усіх учасників операції означає, що при плануванні маршруту руху судна безпечна відстань розходження між суднами повинна завжди забезпечувати збереження заданого ризику зіткнення, тобто еліпс заданого ризику одного судна не повинен перетинати еліпс заданого ризику судна-цілі. Така постановка задачі вигідна з точки зору прогнозу дій власного судна і суден-цілей, так як у цьому випадку оптимуму досягає кожен із учасників операції розходження і, припускаючи опуклість інтегрантів, ми практично припускаємо розумність дій оператора.

3.1. Використання функції рівня небезпеки у задачі планування маршруту руху судна.

Існуючі методи та моделі планування маршруту судна, контролю руху судна по маршруту та маневру розходження з суднами-цілями базуються на понятті «безпечної області», яка будується навколо кожного судна і називається «судновий домен». Ця область зміщується разом із судном у напрямку руху судна. Тривалий час цю область приймали у вигляді кола. Потім, спираючись на результати статистичних досліджень руху суден у внутрішніх водах Японії, японські вчені Фудзії і Танака запропонували «судновий домен» у формі еліпса [137-141], що більш природньо, так як судно має видовжену форму. Концепція безпеки, побудована з використанням поняття суднового домену, має істотний недолік - вона копіює ручне прокладання маршруту. У цьому випадку прагнуть знизити обсяг обчислень і змоделювати дії «людини-оператора» при оцінюванні операції прокладання маршруту судна та маневру розходження з суднами-цілями при русі по маршруту. Більш перспективним є перехід до суднового домену, який описується законом розподілу ймовірностей (для технічних систем нормальним законом розподілу). Такий перехід ґрунтується на тому, що ризик є завжди і всюди і не існує області, де ризик відсутній взагалі. Є області, де ризик мінімальний, але він є і це підтверджено практичним досвідом. Таким чином, судновий домен перетворюється у функцію сумарного ризику $C_i(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \mathbf{m}_i)$ і головна задача керування полягає у не перевищенні заданого (допустимого) ризику $C_i(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \mathbf{m}_i) \leq C^{\max}$. Функція сумарного ризику $C_i(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\sigma}_i, \mathbf{m}_i)$ залежить від похибок вимірювання положення власного судна і суден цілей, похибок оцінювання параметрів руху власного судна і суден-цілей, похибок визначення розмірів власного судна і суден-цілей, тощо, де \mathbf{x}_i - вектор положення довільної точки відносно центру обертання власного судна або судна цілі, $\boldsymbol{\sigma}_i$ - вектор середньоквадратичних відхилень зазначених похибок вздовж осей зв'язаної

системи координат, \mathbf{m}_i – вектор математичних очікувань похибок вимірювання.

На рис. 3.1 наведено суднові домени, побудовані з використанням функції сумарного ризику. Побудова суднових доменів і поля ризиків, як суми суднових доменів та полів ризиків інших номінальних навігаційних небезпек не становить складності на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки та інтернет технологій. Разом з тим, слід постійно контролювати, з використанням радіолокаційних, оптичних та звукових спостережень, поточні навігаційні обставини, які можуть відрізнятись від номінальних по причині неможливості врахування, при плануванні маршруту руху судна, ряду непередбачуваних факторів. Ведення належного навігаційного спостереження регламентується Правилем 5 МПЗЗС-72.



Рисунок 3.1 – Суднові домени, побудовані з використанням функції сумарного ризику

3.2 Автоматична прокладка маршруту руху судна з урахуванням функції рівня небезпеки

Навігаційний перехід судна із порту виходу до порту призначення може бути здійснено різними маршрутами. На вибір безпечного маршруту

руху судна впливають навігаційні обмеження, метеорологічні умови плавання у різну пору року, перетинання затверджених ММО піратських зон, зміни напрямку та швидкості течій, наявність на маршруті руху інших суден, тощо. Але, навіть при наявності таких обмежень, залишається нескінченна кількість безпечних та оптимальних траєкторій щодо здійснення навігаційного переходу між портом виходу і портом призначення. На сьогодні розроблені стандартні рекомендації по ручному прокладанню маршруту руху судна які зібрані у довіднику «Океанські шляхи світу», згідно з якими може бути прокладено безліч маршрутів, що відповідають вже дослідженим обмеженням для певного району плавання у різну пору року, але жоден із них не буде оптимальним.

Для прокладання оптимального маршруту руху судна потрібна оптимізація вибраного критерію оптимальності, що може бути реалізовано лише за умови використання числових методів оптимізації у бортовому обчислювачі. Таким критерієм може бути, наприклад, інтегральний ризик на маршруті руху судна та безпосередньо при виконанні маневру розходження з суднами цілями, а задачею оптимального планування – мінімізація цього ризику

$$L^*(\mathbf{x}(t)) \rightarrow \min C;$$

$$C(\mathbf{x}) = \frac{C_m}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{L(t)} e^{-\frac{1}{2-2r_{xy}} \left[\frac{(v_x t - x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(v_x t - x_0)(v_y t - y_0)}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} + \frac{(v_y t - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]} dt \quad (3.1)$$

На рис. 3.2 наведено основні етапи автоматичного прокладання маршруту руху судна з урахуванням функції рівня небезпеки

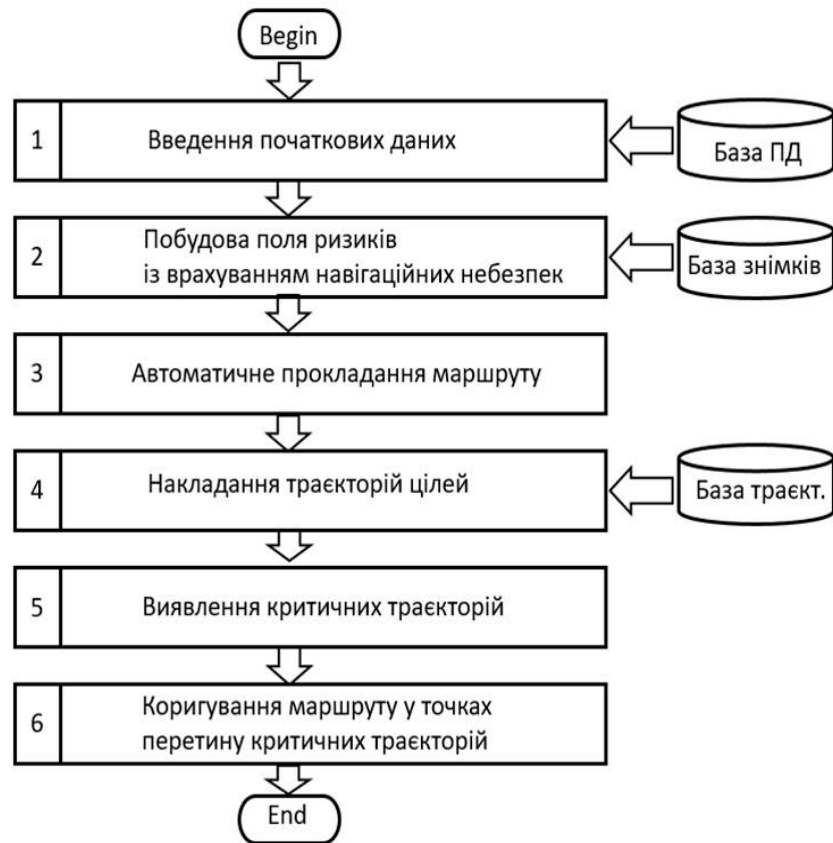


Рисунок 3.2 – Основні етапи автоматичного прокладання маршруту руху судна з урахуванням функції рівня безпеки

Блок 1 «Введення початкових даних» призначений для автоматичного введення із бази даних усіх початкових умов (координати початкової точки «порт відходу», координати кінцевої точки «порт приходу», початковий курс, район плавання, середньоквадратичні дані невизначеностей, значення заданого ризику, навігаційні, гідрографічні та погодні обмеження, інші дані у електронному вигляді, що використовуються при плануванні маршруту, див. розділ 1.3).

Блок 2 «Побудова поля ризиків із врахуванням навігаційних небезпек» призначений для: побудови поля ризиків району плавання на основі супутникових знімків, або електронно – картографічної інформації району плавання; побудови контурів рівних ризиків та виділення контуру заданого ризику; відображення контурів ризиків на терміналі. Більш детальний опис роботи блоку 2 наведено у Додатку Б.

Блок 3 «Автоматичне прокладання маршруту руху судна» призначений для автоматичного прокладання оптимального маршруту руху судна у побудованому полі ризиків із використанням градієнтних методів.

На рис. 3.3 наведена спрощена процедура автоматичного прокладання маршруту руху судна з урахуванням функції рівня небезпеки.

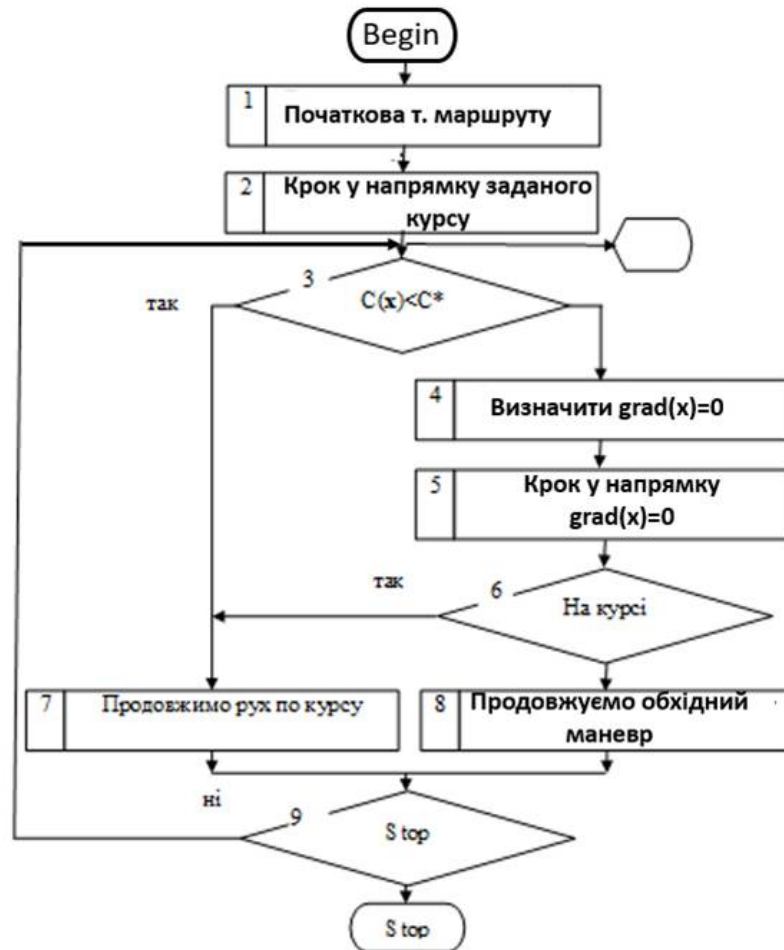


Рисунок 3.3 – Спрощена процедура автоматичного прокладання маршруту з урахуванням функції рівня небезпеки

Із визначеної початкової точки маршруту руху судна (рис. 3.3) робиться крок у напрямку заданого курсу та оцінюється ризик у новій точці маршруту. Якщо значення ризику у новій точці не перевищує заданий рівень (оцінюється логічним блоком 3), то продовжуємо прокладку у напрямку плеча маршруту руху судна. Якщо ризик у новій точці перевищує заданий,

розраховується нульовий градієнт поля ризику у поточній точці і робить крок у напрямку цього градієнту. Так повторюється до тих пір, поки траєкторія обходу навігаційної небезпеки не перетне плече маршруту руху судна, на якому знаходиться дана навігаційна небезпека, після чого алгоритм робить кроки у напрямку заданого плеча маршруту руху судна.

На рис. 3.4 зображена схема автоматичного прокладання маршруту руху судна при обході навігаційної небезпеки

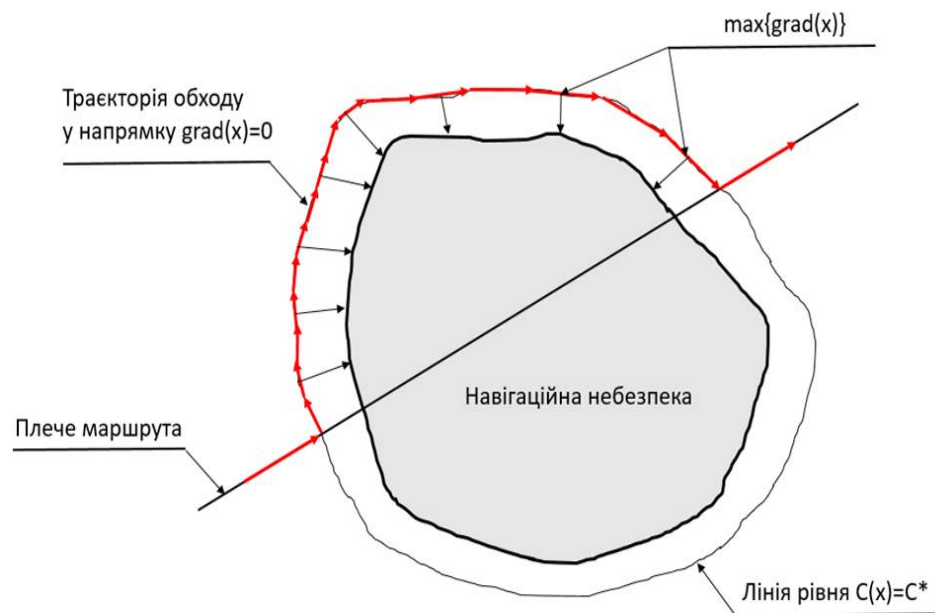


Рисунок 3.4 – Схема автоматичної прокладки маршруту при обході навігаційної небезпеки

Блок 4 «Накладання траєкторій руху суден-цілей» призначений для накладання на побудоване поле ризиків номінальних траєкторій руху усіх суден цілей із бази траєкторій руху суден цілей заданого району плавання та відображення їх на моніторі.

На рис. 3.5а),б) наведено супутниковий знімок району плавання з траєкторіями руху суден цілей і траєкторії руху власного судна та цифрове зображення району плавання для подальшого опрацювання у бортовому контролері.

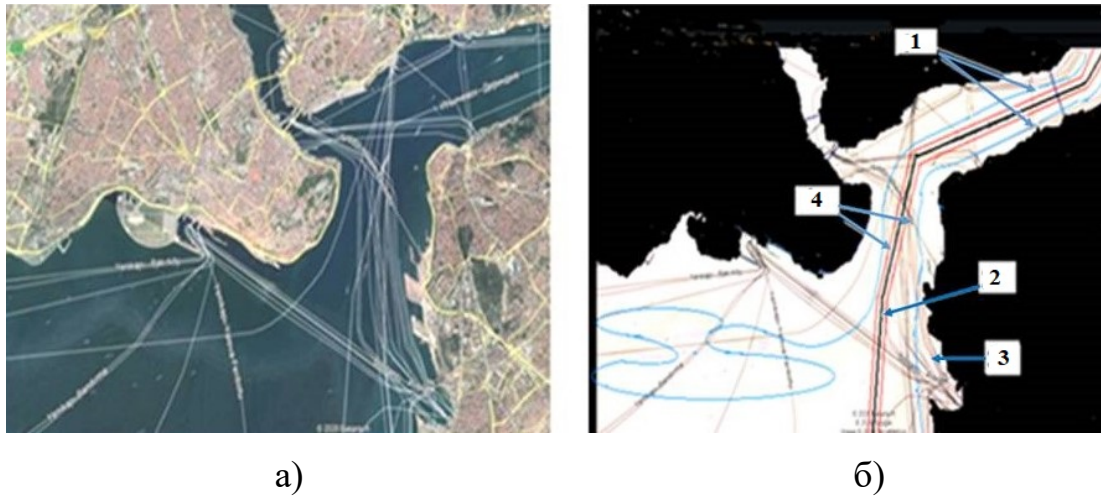


Рисунок 3.5 – Супутниковий знімок району плавання та його цифрова обробка

Лінії синього кольору, позиція 1, визначають критичний ризик, причиною якого є мілководдя поруч з береговою лінією. Лінія чорного кольору, позиція 2, визначає траєкторію руху та максимальне значення поля ризику власного судна. Лінії фіолетового кольору, позиція 3, визначають траси та максимальні ризики, створювані суднами цілями. Лінії червоного кольору, позиція 4, визначають коридор небезпечних ризиків власного судна.

Блок 5 «Виявлення критичних траєкторій руху» призначений для виявлення критичних траєкторій руху суден цілей, із якими можливе зіткнення, рис.3.6.

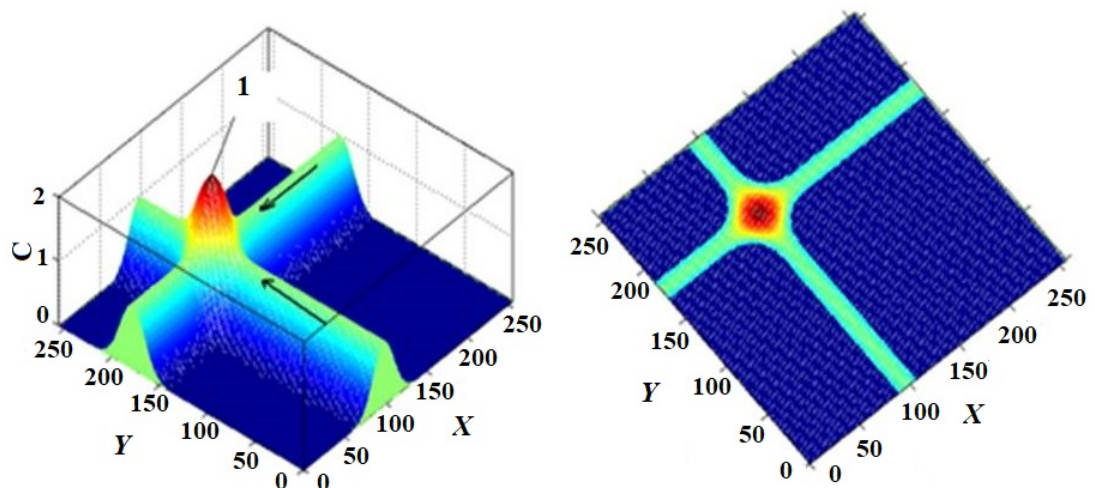


Рисунок 3.6 – Критична траєкторія руху щодо можливого зіткнення

Точка зіткнення 1 може бути активною, якщо власне судно і судно ціль прибувають до неї одночасно, або пасивною, якщо власне судно і судно ціль прибувають до неї у різний час з інтервалом, який не перевищує заданий ризик C_k .

$$t \in [t_0, T]; \quad \varepsilon_k = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\mathbf{x}_1(T) - \mathbf{x}_2(T)\| \geq C_k \\ 0 & \text{if } \|\mathbf{x}_1(T) - \mathbf{x}_2(T)\| < C_k \end{cases} \quad (3.2)$$

Траєкторії руху судна, що містять активні точки зіткнення, називаються критичними. Для некритичних траєкторій руху прибирати їх поля ризиків недоцільно, так як певний ризик зберігається навіть для гарантованої некритичної траєкторії руху. Це пов'язано із «людським чинником», помилкою спостереження, несподіваним маневром судна цілі.

На рис. 3.7 наведено фрагмент району плавання із зображенням критичної траєкторії руху судна

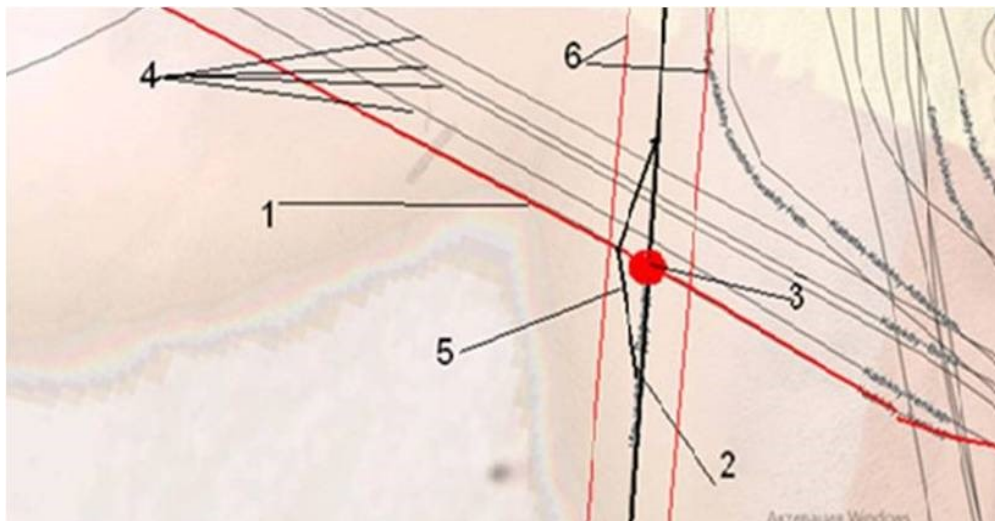


Рисунок 3.7 – Фрагмент району плавання із зображенням критичної та не критичних траєкторій руху судна

Критична траєкторія руху 1, траєкторії руху власного судна 2, точки зіткнення 3, некритичних траєкторій руху 4, траєкторії руху при виконанні

маневру для ухилення від зіткнення з критичною траєкторією руху судна цілі 5, коридор ризиків власного судна 6.

Для визначення критичності траєкторії руху судна, блок 5 розраховує положення судна цілі, що рухається по цій траєкторії, на момент знаходження власного судна у точці 3.

Якщо відстань між судном, на момент його знаходження у т. 3, і ціллю більша зони заданого ризику, то траєкторія не є критичною. У іншому випадку траєкторія руху судна цілі критична і виникає необхідність коригування траєкторії руху власного судна для безпечного розходження із судном ціллю.

Блок 6 «Коригування маршруту у точках перетину критичних траєкторій руху судна» виконує коригування траєкторії руху власного судна у районі точки зіткнення 3 у межах поля допустимих ризиків, позиція 6. Фактично, у цьому випадку вирішується задача оптимального розходження потраєкторії заданого ризику C^* , яка буде розглянута у наступному розділі.

На рис. 3.8 наведено ілюстрацію процесу коригування маршруту у точці перетину з критичною траєкторією.

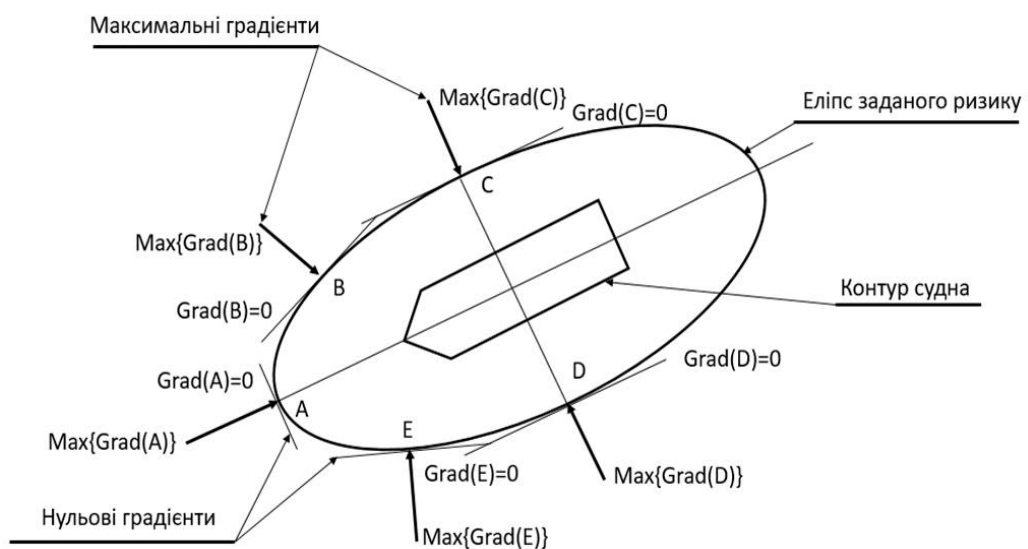


Рисунок 3.8 – Ілюстрація процесу коригування маршруту у точці перетину з критичною траєкторією.

Графічно зображено контур судна – цілі, еліпс заданого ризику, максимальні градієнти у довільних точках А, В, С, D, Е еліпсу, перпендикулярні контуру еліпса у цих точках, і нульові градієнти у цих же точках, дотичні до контуру еліпса. Робота алгоритма коригування маршруту руху судна у точках перетину критичних траєкторій аналогічна роботі алгоритму автоматичної прокладки маршруту руху судна при обході навігаційної небезпеки (рис. 3.4), за винятком того, що обхід виконується по еліпсу заданого ризику.

3.3 Метод градієнту в задачі планування маршруту руху судна

У розділі 2 розглянуто поле ризиків, як сукупність сумарних ризиків багатьох факторів: навігаційних небезпек $C_n(\mathbf{x})$, власного ризику $C_0(\mathbf{x})$, ризиків інших суден - цілей $C_i(\mathbf{x})$, що беруть участь в операції та інших. Зазначено, що сумарний ризик кожного із факторів має нормальний закону розподілу імовірності втрат і може бути представлений у вигляді

$$C_i(\mathbf{x}) = \frac{C_m}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2-2r_{xy}} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x^2\sigma_y^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]}, i = 0..n \quad (3.3)$$

Сумарні ризики $C_i(\mathbf{x}), i = 0..n$ і все поле ризиків, як сума ризиків $C_i(\mathbf{x}), i = 0..n$, мають гладку поверхню, що дозволяє використовувати прості градієнтні процедури для вирішення оптимізаційних задач. Головною перевагою градієнтних процедур є їх простота, можливість суттєво скоротити час пошуку оптимального рішення та підвищити надійність отримання кінцевого результату.

Знайдемо градієнт сумарного ризику $C_i(\mathbf{x})$ (3.3) для кожного із факторів $i = 0..n$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{grad}C_i(\mathbf{x}) = (\mathit{grad}_x C_i(\mathbf{x}), \mathit{grad}_y C_i(\mathbf{x})) \\ \mathit{grad}_x C_i(\mathbf{x}) = \frac{\partial C_i(\mathbf{x})}{\partial x} = -\frac{1}{(2-2r_{xy})} \left[\frac{2(x-x_0)}{\sigma_x^2} - \frac{r_{xy}(y-y_0)}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \right] C_i(\mathbf{x}) \\ \mathit{grad}_y C_i(\mathbf{x}) = \frac{\partial C_i(\mathbf{x})}{\partial y} = -\frac{1}{(2-2r_{xy})} \left[\frac{2(y-y_0)}{\sigma_y^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \right] C_i(\mathbf{x}) \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Так як

$$\frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i(\mathbf{x})}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i(\mathbf{x})}{\partial y};$$

то

$$\mathbf{grad}C(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{grad}C_i(\mathbf{x})$$

Гradientфункції ризику $\mathbf{grad}C(\mathbf{x})$ є найбільш небезпечним напрямком збільшення ризикуполя

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{j+1} &= \mathbf{x}_j + \frac{v}{|\mathbf{grad}C(\mathbf{x})|} \mathbf{grad}C(\mathbf{x}), j = 1..m \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Де: v - модуль швидкості руху.

Наявність найбільш небезпечного напрямку збільшення ризику означає також наявність найбільш безпечного напрямку $-\mathbf{grad}C(\mathbf{x})$ у протилежну сторону та напрямків із нульовим значенням gradientу $\mathbf{grad}C(\mathbf{x}) = 0$, на яких зберігається заданий ризик зіткнення, див рис.3.8.

Напрямки $\mathbf{grad}C(\mathbf{x}) = 0$ перпендикулярні $\mathbf{grad}C(\mathbf{x})$

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + \frac{v}{|\mathbf{grad}C(\mathbf{x})|} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{grad}C(\mathbf{x}), j = 1..m \quad (3.6)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$$

Де:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} - \text{оператор повороту } \mathbf{grad}C(\mathbf{x}) \text{ по годинниковій стрілці на } \frac{\pi}{2}$$

Для повороту $\mathbf{grad}C(\mathbf{x})$ проти годинникової стрілки потрібно використовувати оператор $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

У задачах планування маршруту або розходження із однією ціллю, потрібно додатково до (3.6) контролювати не перевищення заданого ризику зіткнення

$$\begin{cases} C(\mathbf{x}) \leq C^* \\ \mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + \frac{v}{|\mathbf{grad}C(\mathbf{x})|} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{grad}C(\mathbf{x}), j = 1..m \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

У задачах прокладання маршруту руху судна або розходження із декількома суднами-цілями при русі по маршруту, необхідно забезпечити не перевищення заданого ризику зіткнення для кожної із них. Це накладає додаткову вимогу щодо вибору початкової точки $|\mathbf{grad}C(\mathbf{x}_0)|=0$ у полі ризиків, яка відповідає найменшому значенню ризику $C(\mathbf{X}_0) = \min\{C(\mathbf{X}_0)\}$. Подальше прокладання маршруту руху судна або розходження із декількома суднами-цілями при русі по маршруту полягає у сліпому маневруванні вздовж траєкторії L^* відповідно до умов системи (3.8)

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \in L^* \\ \mathbf{x}_0 \rightarrow \min |\mathbf{grad}C(\mathbf{x})| \\ C(\mathbf{x}) \leq C^* \\ \mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + \frac{v}{|\mathbf{grad}C(\mathbf{x})|} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{grad}C(\mathbf{x}), j = 1..m \\ \mathbf{x}_m \in L^* \end{array} \right. \quad (3.8)$$

3.4. Математичне моделювання задачі планування маршруту руху судна.

У попередніх розділах відмічалось, що для планування маршруту руху судна можуть використовуватися супутникові знімки або дані електронних навігаційних карт району плавання. У задачі, що розглядається, планування маршруту руху судна проведено із використанням супутникового знімку району плавання Гвінейська затока, при виконанні навігаційний перехід між портом відходу Дакар (Сінегал) та портом приходу порт Лагос (Нігерія) здійснювався судном типу контейнеровоз «MSC Panaya» у січні 2022 під керуванням автора (Capt. Pavlo Mamenko) рис. 3.9.

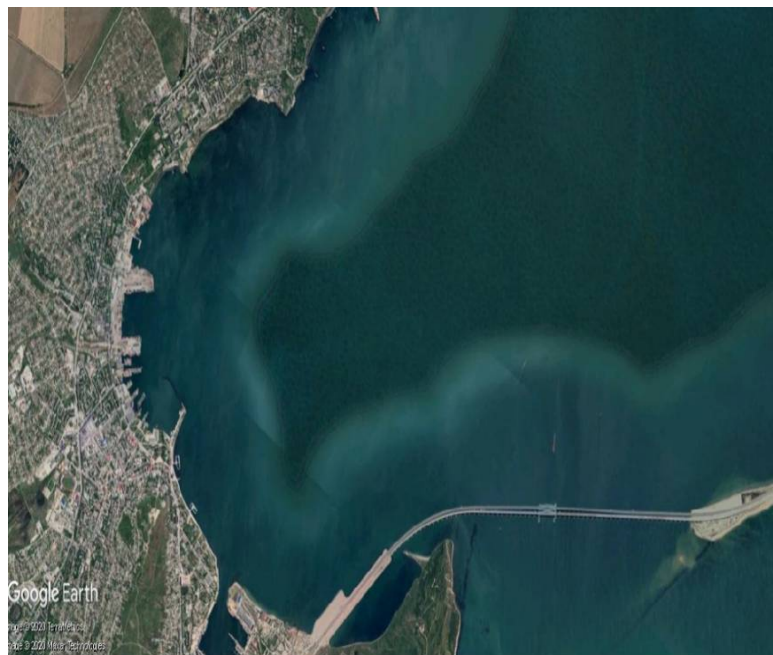


Рисунок 3.9. – Супутниковий знімок району плавання Гвінейська затока

На рис. 3.10 зображена ділянка електронної карти Гвінейської затоки з зображенням положення та руху суден за інформацією АІС у реальному часі

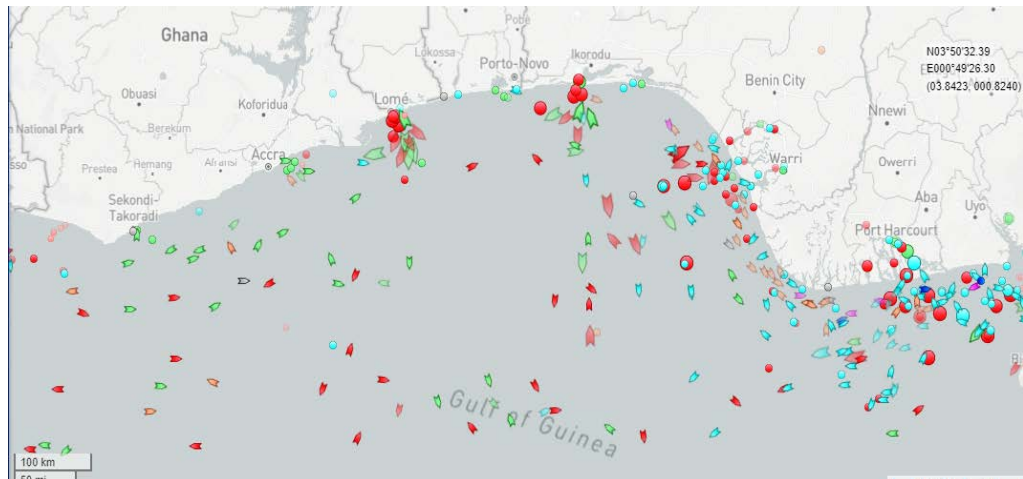


Рисунок 3.10 – Електронна карта Гвінейська затока у реальному часі

Сучасні фотографії із космосу мають величезну інформативність і дозволяють відстежувати профілі глибин. Однак, для отримання можливості побудови функції ризиків району плавання, необхідно попередньо усунути вплив берегового фону і нормувати ризик у діапазоні 0-1. Ці операції виконуються з використанням програм, розроблених автором, та наведених у Додатку Б.

Основна програма диспетчер використовується для загальних налаштувань та виклику інших функціональних модулів.

Попередньо, знімок району плавання обмежується районом акваторії, потім виконується фільтрація, для зменшення рівня шумів зображення і більш чіткого розрізнення структурних особливостей фону. Для усунення невизначеностей, пов'язаних із граничними значеннями поля ризику, виконується операція обмеження - попередньо обчислюється середній рівень знімку та усі дані, що перевищують середній рівень, обмежується значенням 1. Таким чином, усі контури, значення яких вищі середнього, приймаються за межі граничного ризику. Ця операція може виконуватися більш точно, з урахуванням фактичного профілю глибин, але у

даній задачі розглядається найбільш безпечний випадок. Оцифрований, згладжений та нормований знімок району Гвінейської затоки (акваторія порт Лагос) наведено на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Оброблений знімок району акваторії порту Лагос (Нігерія)

На рис. 3.12 наведено знімок з космосу ділянки якірної стоянки та фхідного фарватеру до порту Лагос (Нігерія) з інформацією АІС суден у реальному часі



Рисунок 3.13 – Супутниковий знімок порт Лагос у реальному часі

Після отримання поля ризиків району плавання, виконана автоматична прокладка. Для побудови маршруту руху судна використана функція Stras, Додаток Б.

На рис. 3.14 наведено фрагмент поля ризиків прокладеного маршруту у районі плавання акваторія порту Лагос рис. 3.11.

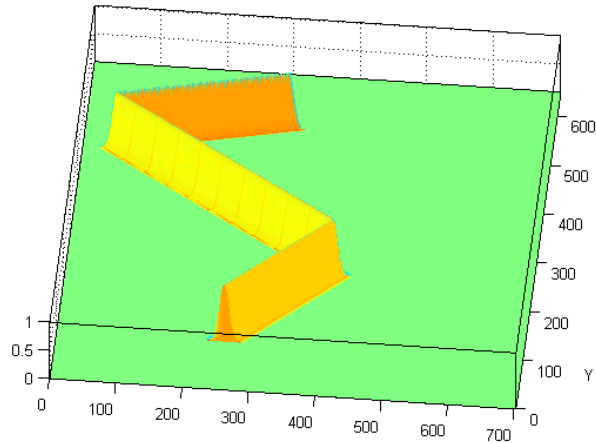


Рисунок 3.14 – Поле ризиків прокладеного маршруту

Наведений на рис. 3.14 фрагмент поля ризиків траси акваторії порту Лагос не враховує поля ризиків району плавання Гвінейська затока. Так як поле ризику траси нормоване одиницею, отримання сумарного поля ризику району плавання і траси здійснюється простим додаванням цих полів ризику.

На рис. 3.15 наведено сумарне поле ризику

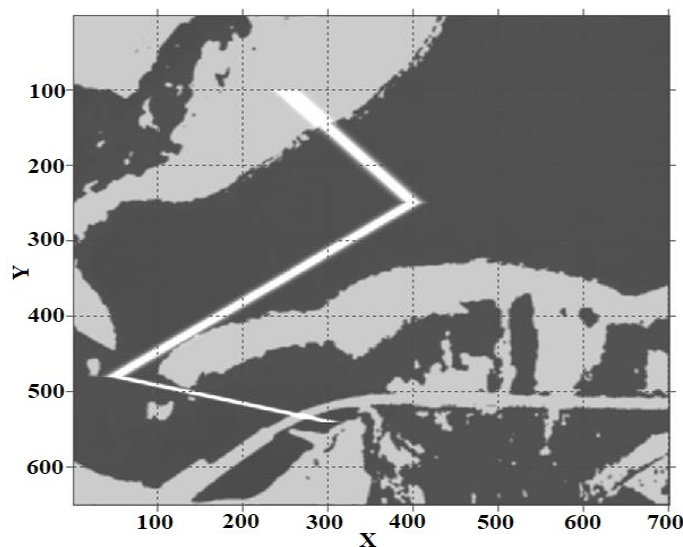


Рисунок 3.15 – Сумарне поле ризику траси і району плавання
Гвінейська затока

Поле ризику траси виділене світлим тоном враховує обмеження за глибинами та іншими навігаційними небезпеками. Зі зміною рівня ризику району змінюється і загальний ризик, що відображено на приведеному рис. 3.15 зміною ширини траси. Це дозволяє візуально оцінювати якість прокладки траси. Як видно із наведеного рис. 3.15, найбільший ризик припадає на початкову ділянку траси, що проходить при наближенні до акваторії порту Ломе з північного заходу по малим глибинам. Також навігація в цьому районі ускладнюється скупченням суден що рухаються до якірної стоянок та постійною присутністю днопоглиблювального судна, що виконує роботу по полибленню фарватеру.

Так як поле ризиків району плавання та власний ризик нормовано у діапазоні 0–1, можна отримати ознаку небезпечних ділянок, а саме, якщо повний ризик перевищує 1, то дана ділянка маршруту є потенційно небезпечною.

У таблиці 3.1 наведені порівняльні дані ручної прокладки маршруту руху судна ECDIS на судні «MSC Panaya» для районів плавання та автоматичної прокладки маршруту руху судна для тих же районів плавання. При цьому здійснювалися практичні спостереження та порівняння таких параметрів як час, що до виконання прокладки маршруту руху судна; різниця у пройденій відстані та показники витрат палива та змашувальних матеріалів при різних погодних умовах та напрямках течій при виконанні рейсового завдання за маршрутами: Маршрут №1 порт Гібралтар – порт Лагос (Апапа), маршрут №2 порт Ломе (Того) – Кейптаун (ПАР), маршрут №3 Котону (Бенін) – Дурбан (ПАР). Отримані порівняльні дані зведені у таблицю та відзначено, що відносне зменшення довжини маршруту та витрат палива при автоматичній прокладці становить приблизно 7%, у порівнянні із ручною прокладкою у ECDIS, а час автоматизованої прокладки маршруту руху судна у 10 разів менше часу використаного при ручній прокладці маршруту руху судна.

Таблиця 3.1. Порівняльні дані ручної (ECDIS) та автоматичної прокладки маршруту руху судна.

Маршрути	Ручна прокладка в ECDIS		Автоматичне прокладка		Відносне відхилення	
	Довжина маршруту, м/мілі	Час прокладки, сек	Довжина маршруту, м/мілі	Час прокладки, сек	Довжина маршруту, %	Час прокладки, рази
№1	3427	600	3197,4	60	-6,7	10
№2	2984	600	2790	60	-6,5	10
№3	3447	600	3213	60	-6,8	10

3.5. Висновки по розділу 3

1. Розглянуті питання щодо використання критерію ризику у задачі планування маршруту руху судна. Зазначено, що традиційна концепція безпеки, побудована з використанням поняття суднового домену, має істотний недолік - вона копіює ручну прокладку маршруту руху судна. Показано, що більш перспективним є перехід до суднового домену, який описується законом розподілу імовірностей. Такий перехід ґрунтується на тому, що ризик є завжди і всюди і не існує області, де ризик відсутній взагалі.

2. Розглянуті питання автоматичної прокладки маршруту руху судна у полі ризиків. Наведено алгоритм автоматичної прокладки маршруту руху судна та дано опис основних функціональних блоків. Показано, що використання поля ризиків дозволяє підтримувати зручні екранні форми для візуалізації поля операцій.

3. Розглянуті питання використання градієнтних методів у задачі прокладки маршруту руху судна. Зазначено, що: гладкість полів ризиків

дозволяє використовувати прості градієнтні процедури для вирішення оптимізаційних задач; головною перевагою градієнтних процедур є їх простота, можливість суттєво скоротити час пошуку оптимального рішення та надійність отримання кінцевого результату. Приведені умови використання градієнтних процедур у задачах прокладки маршруту судна і виконання маневру розходження при русі по маршруту із однією та де – кількома небезпечними суднами-цілями.

4. Розроблено метод планування маршруту руху судна, який полягає у побудові у бортовому обчислювачі поля ризиків з використанням електронних навігаційних карт, електронних графіків руху суден, радіолокаційного і оптичного полів, визначенні параметрів руху суден цілей по даним РЛС та АІС (ЗНО), коригуванні траєкторії руху власного судна із використанням градієнтних процедур та заданого ризику зіткнення, на відміну від існуючих забезпечує автоматичне планування маршруту руху судна та оперативне відображення даних, що дозволяє автоматизувати рутинні операції та скоротити час прокладання маршруту у 10 разів, скоротити загальний час підготовки до виконання рейсового завдання на 10%, скоротити пройдену дистанцію маршруту руху судна та при цьому зменшити витрати палива на 7%.

5. Проведено математичне моделювання процесів прокладання маршруту руху судна із використанням розроблених процедур та градієнтних методів. Результати моделювання підтвердили працездатність та ефективність розроблених методів, алгоритмічного та програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 4. РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ

Дослідження проблеми ефективних методів запобігання зіткненню суден набуло першочергового значення у зв'язку із збільшенням тоннажу, габаритних розмірів, швидкості та чисельної кількості суден, що беруть участь у перевезеннях вантажів водними шляхами. Важливим є фактор появи автоматизованих систем з автоматичними модулями керування а також експериментальних автономних суден і систем, дії яких мають чіткий алгоритм і конкретну мету. Використання таких систем керування дозволяє зменшити невизначеність при взаємодії суден, так як мінімізується вплив «людського чиннику» на процеси керування рухом судна. Основним інструментом, який використовується на сучасних суднах для виконання маневру розходження з іншими суднами цілями, є ЗАРП [78-81]. ЗАРП значно полегшує роботу судноводія, так як звільняє його від багатьох ручних операцій, а вбудована функція «Програвання маневру» дозволяє використовувати зручний графічний інтерфейс для візуалізації можливого маневру розходження із багатьма суднами цілями. Разом з тим, ЗАРП має і суттєві недоліки, які полягають у тому що ЗАРП залишається автоматизованою системою і всі рішення по керуванню рухом судна приймає судноводій, що потребує часу на прийняття рішення і не виключає певні помилки. Функція ЗАРП «Програвання маневру», як і при ручній радіолокаційній прокладці, не дозволяє розходитися із цілями що маневрують, так як задача вирішується разово, перед початком виконання маневру розходження суден. Багато робіт, наприклад, [8, 82-88,99-113, 119, 120, 143-145] присв'ячені автоматизації процесів розходження суден з використанням сучасних бортових обчислювачів. Як правило, ці методи пов'язані із побудовою оптимальних алгоритмів розходження, що забезпечують оптимізацію заданої функції якості керування рухом судна. Існуючі методи безпечного розходження власного судна із суднами-цілями або іншими об'єктами базуються на критерії абсолютної безпеки. Проте,

зіткнення трапляються, і «абсолютно» безпечна траєкторія руху судна містить імовірність зіткнення. Зважаючи на це, раціональніше будувати траєкторії руху судна при розходженні суднами-цілями, при врахуванні заданої імовірності зіткнення. Основною перевагою такого підходу є врахування розподілу ризиків навколо власного судна і суден-цілей та можливість оптимізації процесів розходження із заданим ризиком зіткнення. У даному розділі розглядаються питання оптимального розходження суден у полі ризиків, а саме оптимального розходження зміною курсу у «ближній зоні», де існує безпосередня загроза зіткнення і куди, при правильному виборі траєкторії руху судна, судно потрапляти не повинно. Маневрування зміною курсу виправдано, так як зміна швидкості триваліша у часі і не завжди можлива (потрібен перехід у маневровий режим ГД). Розроблені методи та побудовані на їх основі алгоритмічне і програмне забезпечення дозволяють мінімізувати траєкторію руху судна при виконанні маневру розходження за умови не перевищення заданого ризику зіткнення.

4.1. Використання критерію вірогідність зіткнення в задачі розходження суден.

У розділі 2 були розглянуті теоретичні питання оптимального розходження суден із врахуванням інтересів усіх учасників операції та отримана стратегія такого оптимального розходження, що полягає у виконанні умови (2.9),

$$\frac{\partial S_i}{\partial S_j} = 0; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, n}; \quad i \neq j;$$

$$i = j \rightarrow \frac{\partial S_i}{\partial S_j} = 1$$

згідно із якою знайдене оптимальне рішення щодо розходження власного судна із іншими суднами цілями не повинно погіршувати жодне із рішень для суден цілей, тобто, компоненти цільового вектора незалежні і їх

стани не впливають один на одного. При вирішенні задачі розходження суден у полі ризиків, умову (2.9) можна розглядати як обмеження, що полягає у не перевищенні заданого ризику кожним із учасників операції, а основну стратегію керування розглядати як оптимізаційну задачу.

$$\begin{cases} \varphi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} S(\mathbf{x}) \\ C(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \\ L(\mathbf{x}) = \min \int_L \varphi(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ C(\mathbf{x}) \leq C^* \end{cases} \quad (4.1)$$

де $S(\mathbf{x})$ - траєкторія розходження, $C(\mathbf{x})$ – функція ризику, $L(\mathbf{x})$ - найкоротша траєкторія розходження, C^* - заданий ризик.

Задача (4.1) - це векторна задача оптимального керування розподіленою системою. При всій своїй теоретичній складності, вона має просте рішення - потрібно рухатися по лінії рівного ризику судна-цілі, тоді відстань, пройдена при виконанні маневру, буде мінімальною при заданому ризику, а ризик не буде перевищувати заданий. Дійсно, при русі власного судна у напрямку центру еліпсу заданого ризику цілі, збільшується ризик зіткнення, а при русі у зворотньому напрямку, від центру еліпсу, зменшується ризик але збільшується дистанція маневру, так як при віддаленні від центру зростає довжина елемента дуги еліпса. Тому саме «ковзання» по траєкторії заданого ризику цілі визначає оптимальне безпечне розходження суден.

Алгоритм «ковзання» по лінії рівного ризику простий і однозначний, а вирішення таких оптимізаційних задач може здійснюватися у бортовому контролері автоматизованої системи керування рухом судна.

Головна перевага вирішення задачі оптимального розходження суден у полі ризиків - це врахування заздалегідь невизначених факторів при

плануванні розходження суден, що дозволяє значно підвищити надійність маневру розходження та суттєво зменшити кількість зіткнень суден. Іншою перевагою є можливість візуалізації поля ризиків, рис. 4.1, із зображенням ліній рівних ризиків для кожного із учасників операції та градієнтів поля ризиків.

Для нормального закону розподілу сумарного ризику і вибраного значення ризику при виконанні маневру розходження суден, візуально поле ризиків являє собою еліпси рівного ризику, розташовані навколо судна та суден цілей, які рухаються разом із власним судном та суднами цілями, рис. 4.1.

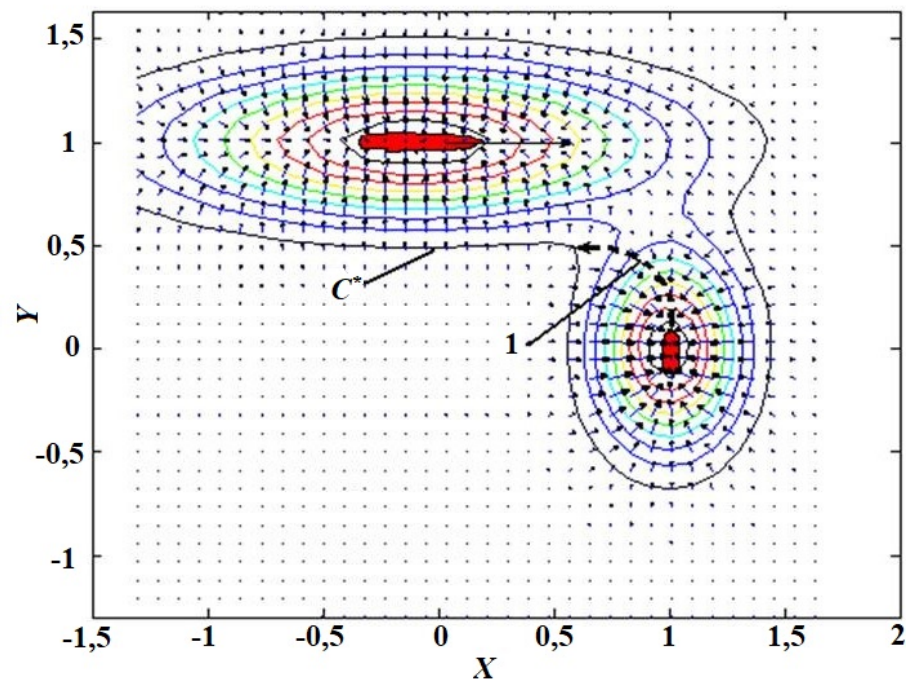


Рисунок 4.1– Візуалізація функції рівня небезпеки

На рис. 4.2 зображена схема безпечного розходження методом «ковзання». Із врахуванням МПЗЗС-72, ковзання еліпсів заданих ризиків власного судна і судна цілі може бути здійснено лише через корму судна цілі, рис. 4.2.

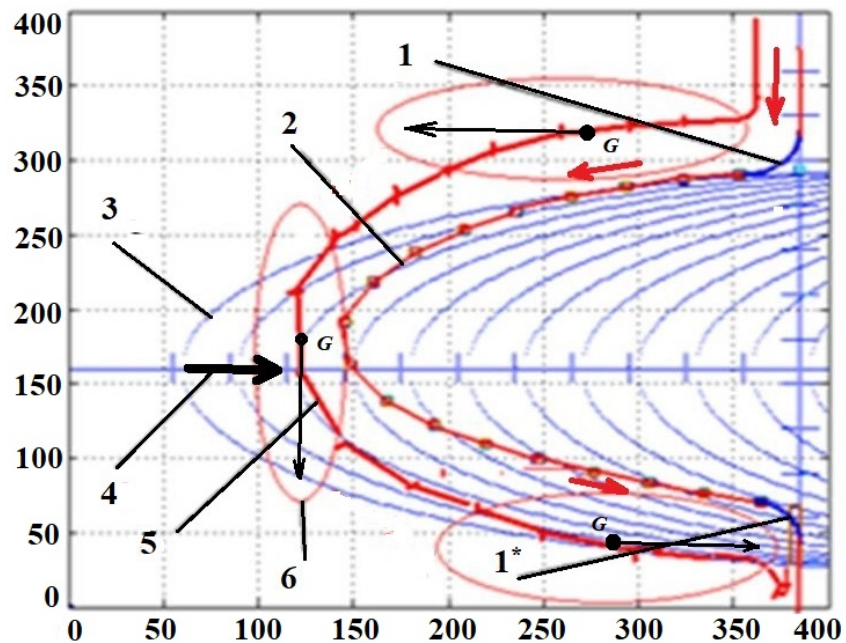


Рисунок 4.2 – Метод «ковзання» по еліпсу заданого ризику цілі

На рис. 4.2 показані: позиція 1 - траєкторія виходу власного судна на еліпс заданого ризику цілі та траєкторія сходу з еліпсу заданого ризику цілі, позиція 2 – траєкторія «ковзання», позиція 3 – послідовні положення еліпсу заданого ризику цілі через фіксовані інтервали часу Δt , що визначаються тактом роботи бортового обчислювача, позиція 4 – вектор швидкості цілі, позиція 5 – траєкторія оптимального розходження, побудована як послідовність положень центру обертання власного судна на еліпсі заданого ризику цілі у різні моменти часу $t, t + \Delta t, t + 2\Delta t, \dots, t + k\Delta t$, позиція 6 – судновий домен власного судна.

4.2. Оптимальне розходження з однією ціллю з урахуванням рівня безпеки

Відповідно до визначеної стратегії розходження суден (2.9) із врахуванням інтересів усіх учасників операції, отримане рішення для власного судна не повинно погіршувати жодне із рішень для інших суден цілей. Для задачі розходження суден у полі ризиків це означає, що еліпс заданого ризику власного судна не повинен перетинати еліпси заданих ризиків інших суден цілей. Ця умова використовується як обмеження при

вирішенні оптимізаційної задачі розходження (4.1), що мінімізує траєкторію розходження при не перевищенні заданого ризику.

Рішенням задачі (4.1) є «ковзання» власного судна по еліпсу заданого ризику судна цілі. На рис. 4.3 зображено власне судно O_1 , у моменти часу $O_1(t-2\Delta t)$, $O_1(t-\Delta t)$, $O_1(t)$, $O_1(t+\Delta t)$, $O_1(t+2\Delta t)$,..., $O_1(t+5\Delta t)$, зв'язана із судном система координат $O_1X_1Y_1$, судно ціль у початковий момент розходження $O_2(t)$ і кінцевий момент розходження $O_2(t+5\Delta t)$, зв'язана із судном ціллю система координат $O_2X_2Y_2$ та еліпси рівних ризиків судна цілі у моменти часу $O_2(t), O_2(t+\Delta t), O_2(t+2\Delta t), \dots, O_2(t+5\Delta t)$. Власне судно O_1 та судно ціль O_2 рухаються зустрічними курсами і існує небезпека зіткнення.

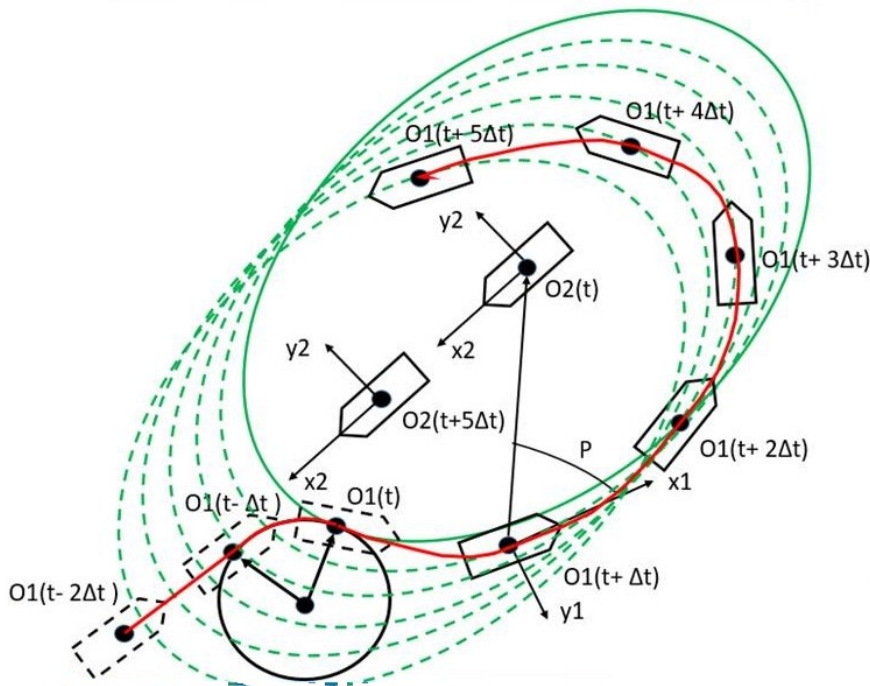


Рисунок 4.3 – Оптимальне автоматичне розходження судна «ковзанням» по еліпсу заданого навігаційного ризику судна-цілі

Для уникнення зіткнення, власне судно, починаючи із позиції $O_1(t-\Delta t)$, переходить по циркуляційній кривій у позицію $O_1(t)$ на еліпс заданого ризику судна-цілі $O_2(t)$ і продовжує далі рух по еліпсу заданого ризику судна-цілі, який переміщується разом із ціллю. Для організації руху

по еліпсу заданого ризику потрібно постійно визначати бокове та кутове відхилення від еліпсу заданого ризику та враховувати його у законі керування рухом судна. Кутове відхилення ΔK визначається як кут відхилення поздовжньої осі O_1X_1 власного судна від $\mathbf{grad} C(\mathbf{x})$, що задає напрямок руху по еліпсу рівного ризику цілі у поточному положенні \mathbf{x} . Для визначення цього напрямку, спочатку необхідно знайти рівняння еліпсу заданого ризику судна-цілі у системі координат власного судна $O_1X_1Y_1$. Як було показано раніше у розділі 2, воно має вигляд (4.2).

$$\begin{cases} \frac{(x-x_0)^2}{(\sigma_x R)^2} - \frac{r_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{(\sigma_x \sigma_y R)^2} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y R)^2} = 1 \\ R^2 = \frac{-4(1-r_{xy})\pi\sigma_x\sigma_y C^*}{C_m} \end{cases} \quad (4.2)$$

Зміщення x_0, y_0 початку системи координат судна-цілі $O_2X_2Y_2$ відносно початку системи координат власного судна $O_1X_1Y_1$ розраховуються по даним вимірювання пеленга P і дистанції D РЛС

$$\begin{aligned} x_0 &= D \cos P \\ y_0 &= D \sin P \end{aligned} \quad (4.3)$$

Із системи (4.2) знаходимо складові $\mathbf{grad} C(\mathbf{x})$.

$$\begin{aligned} \mathit{grad}_x C(\mathbf{x}) &= \frac{2(x-x_0)}{(\sigma_x R)^2} - \frac{r_{xy}}{(\sigma_x \sigma_y R)^2} \\ \mathit{grad}_y C(\mathbf{x}) &= \frac{2(y-y_0)}{(\sigma_y R)^2} - \frac{r_{xy}}{(\sigma_x \sigma_y R)^2} \end{aligned}$$

Тоді, складові градієнта $\mathring{\mathbf{grad}} C(\mathbf{x})$ знаходяться шляхом повороту вектора $\mathbf{grad} C(\mathbf{x})$ на $\frac{\pi}{2}$ з використанням оператора $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$.

$$\mathring{\mathbf{grad}} C(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{grad} C(\mathbf{x}) \quad (4.4)$$

$$\Delta K = \arctg \left\{ \frac{\mathring{\mathbf{grad}}_y C(\mathbf{x})}{\mathring{\mathbf{grad}}_x C(\mathbf{x})} \right\} \quad (4.5)$$

Бокове зміщення власного судна з еліпса заданого ризику судна-цілі також визначається з використанням системи (4.2). Перепишемо систему (4.2) у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} a(y - y_0)^2 - b(y - y_0) + c = 0 \\ a = \frac{1}{(\sigma_y R)^2} \\ b = \frac{r_{xy}(x - x_0)}{(\sigma_x \sigma_y R)^2} \\ c = \frac{(x - x_0)^2}{(\sigma_x R)^2} - 1 \\ R^2 = \frac{-4(1 - r_{xy})\pi\sigma_x\sigma_y C^*}{C_m} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Запишемо рішення квадратного рівняння системи (4.6)

$$(y - y_0)_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.7)$$

Для розрахованих згідно (4.3) значень x_0, y_0 , допускаючи, що поточна координата x знаходиться на еліпсі заданого ризику ($x = 0$), знаходимо із (4.7) значення іншої координати y , яка і буде боковим відхиленням $\Delta y = y$ від еліпсу заданого ризику.

Використовуємо відхилення ΔK та Δy у законі керування

$$\begin{cases} \sigma_y = k_v V_y + k_y \Delta y + k_{Iy} \int \Delta y(t) dt \\ \sigma_z = k_\omega \omega_z + k_\phi \Delta K + k_{I\phi} \int K(t) dt \\ \delta_1 = \sigma_y + \sigma_z \\ \delta_2 = \sigma_y - \sigma_z \end{cases} \quad (4.8)$$

Де: $k_v, k_y, k_{Iy}, k_\omega, k_\phi, k_{I\phi}$ - коефіцієнти ПД – регулятора,

δ_1, δ_2 - відхилення виконавчих пристроїв.

Керування δ_1, δ_2 , що визначаються законами керування (4.8), забезпечують рух власного судна по еліпсу рівного ризику судна-цілі за рахунок підтримання положення власного судна на еліпси рівного ризику та курсу, перпендикулярного полю градієнтів функції ризику судна-цілі.

Існуючі лінійні методи розходження суден, у тому числі і з використанням ЗАРП, менш ефективні, так як не забезпечують оптимізацію процесів розходження. На рис. 4.4 наведені оптимальна траєкторія розходження $X^*(t)$ і лінійна траєкторія розходження, отримана з використанням традиційних методів $X(t)$. Оптимальна траєкторія розходження відрізняється від лінійної безперервною зміною курсу, рис. 4.4.

На рисунку 4.4 показані оптимальна та лінійна траєкторії розходження власного судна із судном ціллю.

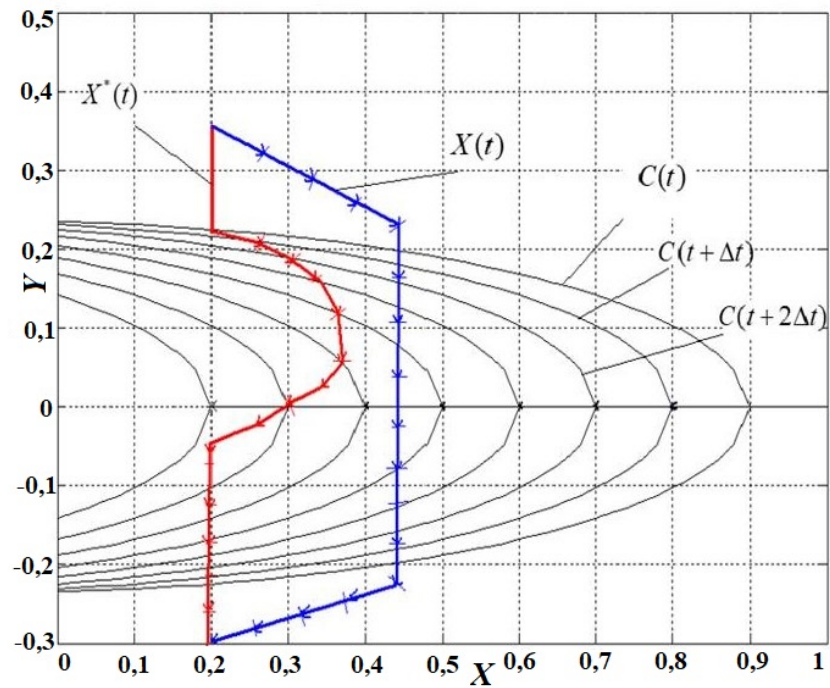


Рисунок 4.4 – Оптимальна і лінійна траєкторії розходження суден

На оптимальній траєкторії руху судно ніде не перевищує заданий ризик і ніде немає ділянок з ризиком, меншим заданого. Лінійна траєкторія $X(t)$ складається із трьох прямолінійних ділянок, які гарантують безпеку розходження, але не оптимальні (пройдена відстань значно більша, ніж при оптимальному розходженні). Оптимальна траєкторія руху $X^*(t)$ забезпечує мінімальну пройдено відстань при розходженні із заданим ризиком.

Важливим елементом маневру розходження суден є вихід на еліпс заданого ризику, для виконання маневру оптимального розходження, та схід з еліпсу заданого ризику, для продовження руху по заданому маршруту руху судна.

На рис. 4.5 наведена розрахункова схема визначення координати точки **A** початку маневру циркуляції для подальшого виходу власного судна на еліпс заданого ризику судна цілі координати точки **B**.

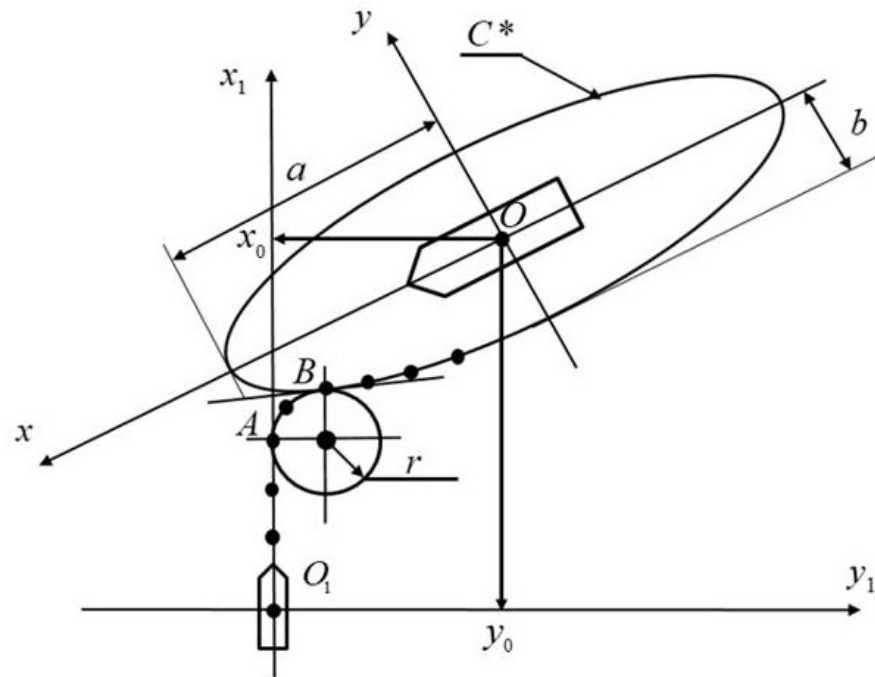


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема визначення початку маневру циркуляції для виходу на еліпс заданого ризику судна цілі

Координати точки **B** визначаються як координати точки дотику циркуляційного кола радіусом r до еліпса заданого ризику судна цілі з полюсами a, b . Рівняння циркуляційного кола r у системі координат $O_1X_1Y_1$, зв'язаною із власним судном, має вигляд

$$(x_1 - x_A)^2 + (y_1 - r)^2 = r^2 \quad (4.9)$$

Рівняння еліпса у системі координат OXY , зв'язаною із ціллю, має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4.10)$$

Система координат OXY зміщена на $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0)$ і повернута відносно системи координат $O_1X_1Y_1$ на кут φ , який визначається різницею курсів

власного судна і цілі. Перехід від системи $O_1X_1Y_1$ до системи OXY визначається системою рівнянь (4.11)

$$\begin{aligned} x &= (x_1 - x_0) \cos \varphi + (y_1 - y_0) \sin \varphi \\ y &= -(x_1 - x_0) \sin \varphi + (y_1 - y_0) \cos \varphi \end{aligned} \quad (4.11)$$

Із врахуванням (4.11), рівняння еліпса (4.10) у системі координат $O_1X_1Y_1$ матиме вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{(x_1 - x_0)^2}{a_1^2} + \frac{(y_1 - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{(x_1 - x_0)(y_1 - y_0)}{c_1^2} = 1 \\ &a_1^2 = \frac{a^2 b^2}{(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi)} \\ &b_1^2 = \frac{a^2 b^2}{(b^2 \sin^2 \varphi + a^2 \cos^2 \varphi)} \\ &c_1^2 = \frac{a^2 b^2}{(b^2 \sin 2\varphi - a^2 \sin 2\varphi)} \end{aligned} \right. \quad (4.12)$$

Координати x_0, y_0 системи (4.12) визначаються за формулами (4.3) по результатам вимірювання пеленга P і дистанції D РЛС. Координати закінчення циркуляції і початку руху по еліпсу заданого ризику $x_1(B), y_1(B)$ знаходяться сумісним вирішенням нелінійних рівнянь (4.3), (4.9), (4.12) на кожному такті бортового обчислювача. Координата початку циркуляції знаходиться як:

$$\begin{cases} x_1(A) = x_1(B) - r \\ y_1(A) = y_1(B) \end{cases} \quad (4.13)$$

Подібним чином визначаються і координати точки сходу із еліпсу заданого ризику цілі.

Лістинг програми оптимального розходження наведено у Додатку Б.8.

4.3. Оптимальне розходження із багатьма цілями з урахуванням рівня небезпеки

Більш складною є задача розходження судна із багатьма суднами-цілями у полі ризиків, так як існує декілька можливих рішень. Кожне таке рішення є оптимальним для задачі (4.1), отже, додатково серед них потрібно вибрати найоптимальніше.

На рис. 4.6 наведено фрагмент району плавання із нанесеними положеннями власного судна C_0 і цілей $C_j, j=1..4$ через рівні проміжки часу.

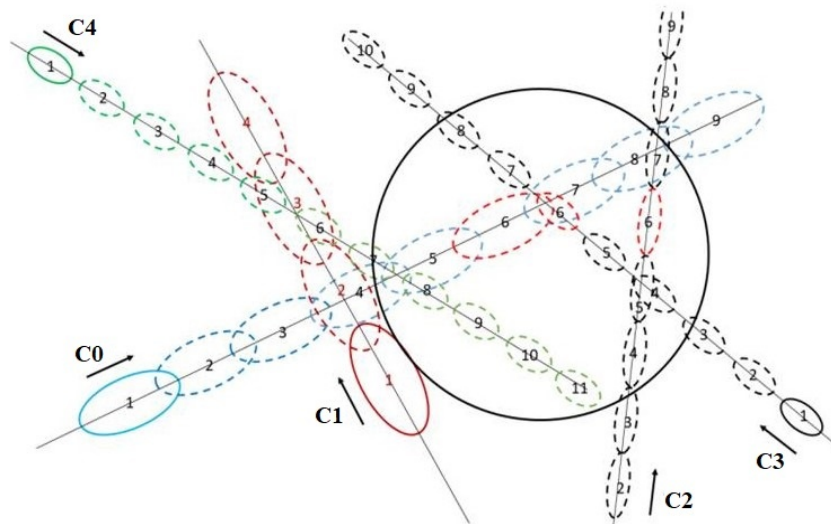


Рисунок 4.6 – Фрагмент району плавання із критичною траєкторією руху судна

Як видно із наведеного прикладу, траєкторія руху цілі C_1 не є критичною, так як позиція 2 домена цілі C_1 перетинається лише із позиціями 3 та 4 домена власного судна C_0 , тобто домен цілі C_1 проходить точку перетину траєкторій руху раніше (на другому умовному інтервалі часу), а домен власного судна C_0 на третьому та четвертому умовному інтервалі

часу. Траєкторія руху судна C_2 також не є критичною, так як домен судна C_2 проходить точку перетину траєкторій руху на сьомому умовному інтервалі часу, а домен власного судна C_0 на восьмому умовному інтервалі часу. Траєкторія руху судна C_3 є критичною, так як домен судна C_3 проходить точку перетину траєкторій на шостому умовному інтервалі і домен власного судна C_0 також проходить точку перетину траєкторій руху на шостому умовному інтервалі. Траєкторія руху судна C_4 не є критичною, так як домен судна C_4 проходить точку перетину траєкторій руху на сьомому та восьмому умовному інтервалі, а домен власного судна C_0 на четвертому умовному інтервалі.

Таким чином, попередній аналіз показав, що існує небезпека зіткнення із судном ціллю C_3 та необхідність виконання маневру розходження. Як було показано вище, маневр розходження із судном ціллю C_3 можна виконати шляхом «ковзання» власного судна по еліпсу заданого ризику судна цілі у сторону корми. Проте, у даному випадку, у зоні розходження суден, що виділена колом, знаходиться ще одне судно ціль C_2 , яке потрібно враховувати при виконанні маневру розходження. Позиції доменів власного судна C_0 , судна цілі C_3 і судна цілі C_2 на шостому умовному інтервалі виділені червоним контуром. У даному випадку теоретично можливі три варіанти маневру розходження суден. Перший варіант – маневр оптимального розходження по еліпсу заданого ризику судна цілі C_3 по носу. Цей варіант суперечить МПЗЗС-72 і на практиці не може бути реалізований. Другий варіант – маневр оптимального розходження по еліпсу заданого ризику судна цілі C_2 по кормі. Третій варіант – маневр оптимального розходження по еліпсу заданого ризику судна цілі C_3 по кормі. Як видно із рис. 4.6, ризик такого маневру у позиції 5 перевищує заданий, так як відстань між еліпсами заданого ризику суден цілей C_2 і C_3 у позиції 5 значно менша ширини еліпса заданого ризику власного судна C_0 . Проте, у

наступних позиціях 6, 7, 8 ризик маневру менше заданого і постійно зменшується.

На рис. 4.7 наведено третій варіант розходження у збільшеному масштабі.

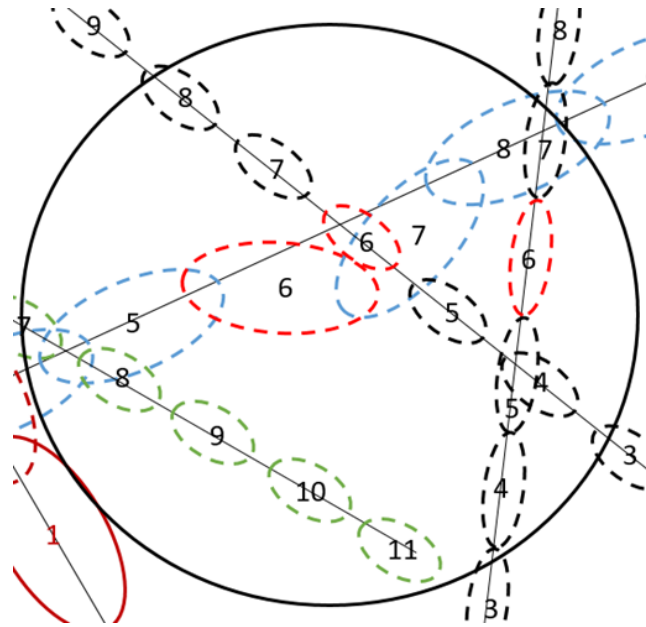


Рисунок 4.7 - Розходження із двома цілями у полі ризиків з використанням градієнтного методу.

Власне судно C_0 оптимально розходиться із судном ціллю C_3 шляхом «ковзання» по еліпсу заданого ризику судна цілі C_3 , при цьому однакові позиції еліпсів заданого ризику власного судна і суден цілей не перетинаються. Другий варіант, у порівнянні із третім варіантом, має довший шлях розходження, так як власне судно оптимально розходиться із більш віддаленим судном C_2 . Тому, із розглянутих варіантів, найбільш оптимальним є третій варіант розходження власного судна C_0 по еліпсу заданого ризику цілі C_2 через корму. Він став можливим лише завдяки врахуванню динаміки зміни поля ризику при вирішенні задачі розходження суден із багатьма суднами цілями.

4.4. Математичне моделювання процесів розходження суден

Математичне моделювання процесів розходження суден у полі ризиків проведено у замкнутій схемі «Система керування – Об'єкт керування».

На рис. 4.8 наведено етапи моделювання процесу розходження із одним судном.

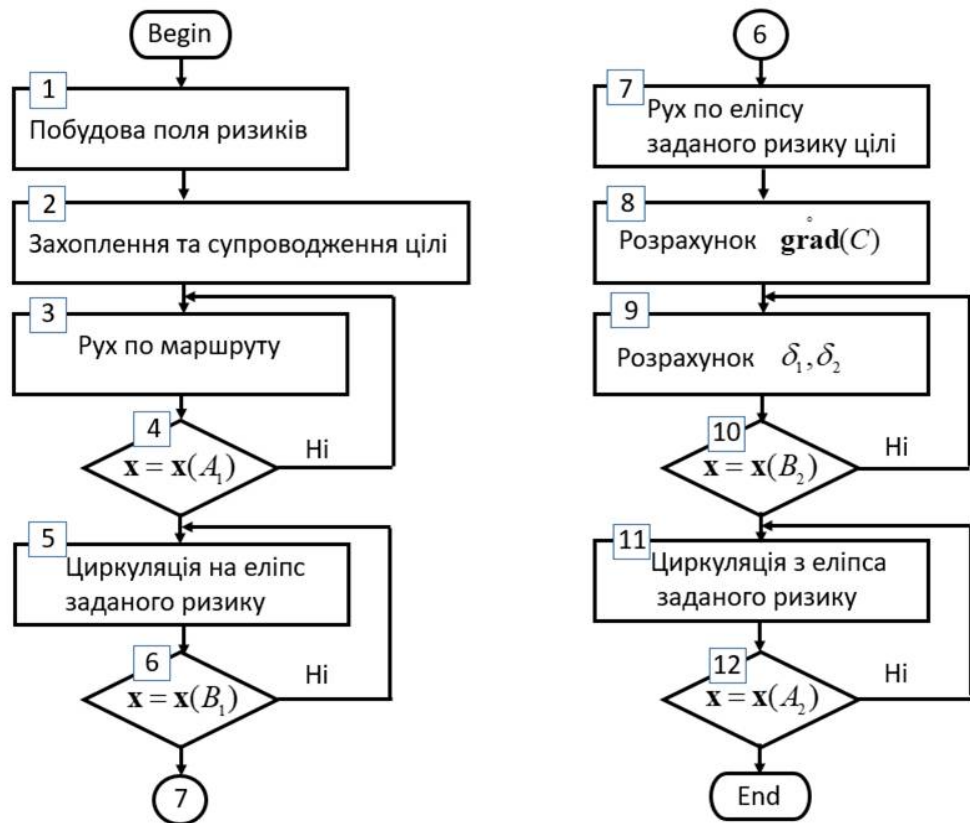


Рисунок 4.8 - Етапи моделювання процесів розходження суден

Блок 1 моделює побудову поля ризиків у відповідності із матеріалом, наведеним у підрозділі 2.3 Поле ризиків.

Блок 2 моделює роботу ЗАРП по захопленню та супроводженню судна цілі.

Блок 3 моделює рух судна по маршруту та розраховує моменти початку і закінчення маневру циркуляції у відповідності до (4.3), (4.9), (4.12), (4.13).

Логічний блок 4 контролює момент початку маневру циркуляції.

Блок 5 забезпечує переміщення керма і циркуляцію радіусом r для виходу власного судна на еліпс заданого ризику.

Логічний блок 6 контролює момент закінчення маневру циркуляції.

Блоки 7, 8, 9 моделюють рух власного судна по еліпсу заданого ризику судна цілі, при цьому Блок 8 розраховує, із використанням формули (4.4), градієнт $\mathbf{grad}C(\mathbf{x})$, що вказує напрямок руху по еліпсу заданого ризику, кутове ΔK та бокове Δu відхилення від еліпсу заданого ризику у відповідності із (4.5), (4.7), а блок 9 розраховує, із використанням (4.8), відхилення керуючих пристроїв δ_1, δ_2 для забезпечення руху власного судна по еліпсу заданого ризику судна цілі.

Логічний блок 10 контролює момент закінчення маневру розходження та початку маневру циркуляції для сходу із еліпсу заданого ризику.

Блок 11 забезпечує переміщення керма і циркуляцію радіусом r для сходу власного судна з еліпса заданого ризику.

Логічний блок 12 контролює момент закінчення маневру циркуляції і продовження руху по заданому маршруту руху судна.

Для проведення математичного моделювання оптимального розходження суден вибрано судно MSC Container Ship (Dis. 32025t). Характеристики судна: тип двигуна – тихохідний дизель (1x15890)kW, тип рушійної установки – FPP, носовий підрулюючий пристрій присутній, кормовий підрулюючий пристрій відсутній, водотоннажність – $Dis = 32025t.$, максимальна швидкість – $V_{max} = 19,4kn.$, довжина – $L = 203,6m.$, ширина – $B = 25,4m.$, носова/кормова осадка – $d = 9,6/10m.$ На робочому місці інструктора створено завдання для моделювання розходження: наше судно рухається курсом 180^0 зі швидкістю 10 м/с (20 вуз.); судно ціль рухається курсом 90^0 також зі швидкістю 10 м/с (20 вуз.). Ймовірність зіткнення прийнята $C(x) = 0,3\%$. Для даної імовірності зіткнення, середньоквадратичних

похибок вимірювання РЛС, наведених у Резолюції А.477(ХІІ). Експлуатаційні вимоги до радіолокаційного обладнання, та середньоквадратичних похибок вимірювання ЗАРП, наведених у документі Резолюція ІМОА.823(19) від 23.11.1995 р.

Експлуатаційні вимоги до засобів автоматичної радіолокаційної прокладки (ЗАРП), побудовано еліпси заданого ризику для власного судна і судна-цілі. При побудові еліпса заданного ризику цілі додатково врахована вартість вантажу у формулі (2.27) через коефіцієнт C_m вартості вантажу у розподілі сумарного ризику.

Результати математичного моделювання наведені на рис. 4.9.

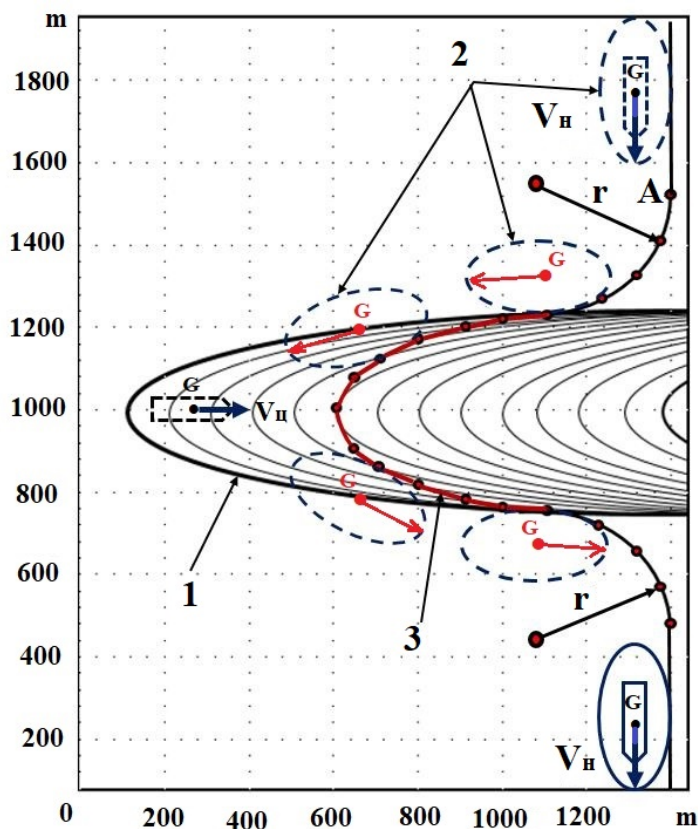


Рисунок 4.9 – Оптиміальне розходження з судном-ціллю з заданим ризиком

Система автоматичного керування рухом судна, після виходу власного судна у позицію А, відхиляє кермо на правий борт і судно починає

циркуляцію з розрахунковим радіусом r для виходу по дотичній на еліпс заданого ризику **1**. Еліпс заданого ризику **1** рухається кутом $K_{Ц} = 90^{\circ}$ разом із ціллю зі швидкістю цілі $V_{Ц}$. Показані послідовні положення еліпсу заданого ризику судна-цілі через 10 с. та оптимальна траєкторія розходження (позначена червоним кольором). Коли власне судно наближається по траєкторії оптимального розходження **3** до лінії початкового курсу на розрахункову відстань, система керування відхиляє кермо вправо, щоб розпочати циркуляцію із заданим радіусом і вийти на лінію початкового курсу. Рух по еліпсу заданого ризику судна-цілі є найтривалішим етапом розходження суден, при якому власне судно «ковзає» еліпсом заданого ризику по оптимальній траєкторії. Такий рух передбачає постійну зміну курсу власного судна, проте, дистанція розходження у даному випадку менша, у порівнянні із дистанцією розходження традиційним методом із використанням ЗАРП. Як видно із рис.4.9, дистанція розходження становить 12 відрізків*100м = 1200м, або $D_{роз} = 0,65nm$, а час розходження $T_{роз} = 12$ відрізків*10с = 120с, $c = 2$ хв.

На рис. 4.10 наведені результати розходження судна MSC Container Ship (Dis. 32025t) із використанням ЗАРП



Рисунок 4.10 – Розходження суден із використанням ЗАРП

Показані кільця віддаленості через 0,5 nm, область безпечного розходження $D_s.a. = 0,5 \text{ nm}$, лінія відносного руху, що проходить через центр розгортки, траєкторія ехосигналу цілі під час розходження, вектор швидкості власного судна у центрі розгортки, вектор відносної швидкості і вектор швидкості цілі. Як видно із рис. 4.10, дистанція розходження, що лежить між т.4 і т.5, дорівнює 1 морській милі, вектор відносної швидкості дорівнює 28 вуз, час розходження $T_{\text{роз}} = 2,1 \text{ хв}$.

Результати розглянутого випадку розходження та двох інших випадків розходження зведені у таблицю 4.1

Таблиця 4.1. Порівняння автоматичного оптимального розходження із розходженням з використанням ЗАРП

Різиця курсів	Розходження із використанням ЗАРП		Автоматичне розходження		Відносне відхилення	
	Довжина траєкторії, милі	Час розходженняхв	Довжина траєкторії, милі	Час розходження хв	Довжина траєкторії, %	Час розходження %
90^0	1,8	2,1	1,2	2	33	5
45^0	2,0	2,3	1,4	2,2	30	4
0^0	2,2	2,5	1,6	2,4	27	4

Як видно із отриманих результатів, у порівнянні із традиційними методами розходження суден із використанням ЗАРП, відносне зменшення довжини траєкторії та витрат палива при автоматичному оптимальному розходженні суден становить приблизно 30%, а зменшення часу розходження становить 4%.

На рис. 4.11 наведені результати математичного моделювання процесів розходження з декількома суднами-цілями у полі ризиків.

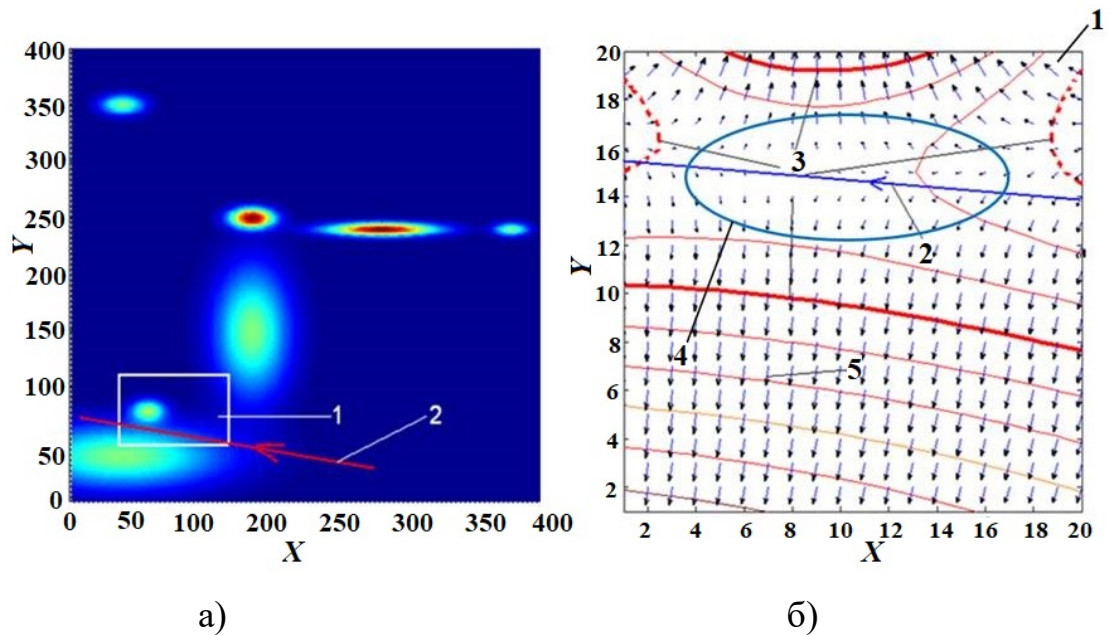


Рисунок 4.11 – Математичне моделювання процесів розходження із декількома суднами-цілями у полі ризиків

Інтерфейсне зображення рис. 4.11, а) відображає положення власного судна і суден цілей з полями ризиків. Для виділеного фрагмента 1, рис. 4.11, а), побудовано поле градієнтів 5, рис. 4.11, б). Як видно із наведеного фрагменту поля градієнтів 4.11, б), траєкторія 2 власного судна проходить по лінії найменших модулів градієнта поля ризиків. При цьому, лінії допустимих ризикі 3, рис. 4.11, б), використовується як обмеження.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Сформульована задача оптимального розходження суден у полі ризиків із врахуванням інтересів усіх учасників операції. Показано, що інтереси усіх учасників операції у полі ризиків будуть враховані, якщо еліпси заданих ризиків власного судна і суден-цілей не перетинаються. Дана умова враховується як обмеження при вирішенні задач оптимального розходження суден у полі ризиків.

2. Розроблено метод оптимального розходження суден у полі ризиків, який, на відміну від існуючих, враховує заданий ризик зіткнення та інтереси усіх учасників операції, що дозволяє науково обґрунтувати розмір зони безпечного розходження, із врахуванням середньоквадратичних значень найбільш суттєвих невизначеностей, зменшити, за рахунок цього, дистанцію розходження та витрати палива під час розходження на 30%, зменшити час розходження на 4%.

3. Розроблено метод оптимального розходження суден у полі ризиків із багатьма суднами-цільми, що враховує інтереси усіх учасників операції та полягає у порівнянні існуючих можливих варіантів оптимального розходження суден, вибору із декілька варіантів такого, що має оптимальну траєкторію розходження за умови не перевищення заданого ризику улюбій точці траєкторії.

4. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення модулів автоматичного керування бортового контролера автоматизованої системи керування рухом суден, що дозволяють реалізувати зазначені методи оптимального розходження власного судна з однією та декількома суднами-цільми.

5. Працездатність та ефективність розроблених методів, алгоритмічного і програмного забезпечення перевірені математичним моделюванням.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вирішується актуальна науково – практична проблема підвищення ефективності автоматизованих систем підготовки судна до виконання рейсового завдання в частині прокладання маршруту руху судна, ефективності розходження суден при русі по маршруту, під час виконання рейсового завдання та, як наслідок, зменшення впливу «людського чиннику», за рахунок розвитку науково – технічних основ, принципів і методів створення автоматичних модулів прокладання маршруту судна та розходження з суднами-цілями при русі по маршруту, що забезпечують оптимізацію функціоналу якості керування для усіх учасників операції у полі ризиків.

У роботі отримані наступні теоретичні та практичні результати:

1. Проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку моделей та методів підвищення безпеки судноплавства, приведена статистика аварій на морському транспорті, проаналізовані причини аварій, встановлено, що «людський чинник» є найслабшою ланкою в автоматизованих системах керування рухом суден. На підставі вивчення та систематизації матеріалів з відкритих джерел щодо підвищення безпеки судноводіння, сформульовано завдання, вимоги та концептуальну модель автоматичної системи керування рухом судна, визначено її структурний склад.

2. Удосконалено принцип підвищення безпеки судноплавства, який, на відміну від існуючих, враховує, при плануванні маршруту, контролю руху судна по маршруту та під час розходження з суднами-цілями при русі по маршруту, інтереси усіх учасників операції у полі ризиків, що дозволяє зменшити ризики зіткнення та підвищити безпеку судноплавства.

3. Розроблено метод побудови сумарного поля ризиків, який полягає у накладанні полів ризиків власного судна, суден-цілей, полів ризиків інших навігаційних небезпек, що дозволяє отримати аналітичний вираз поля ризиків, ліній рівня поля ризиків, з метою візуалізації та

подальшої числової обробки у бортовому обчислювачі системи автоматизованого керування рухом судна.

4. Розроблено метод планування маршруту руху судна, який полягає у побудові у бортовому обчислювачі поля ризиків з використанням електронних навігаційних карт, електронних графіків руху суден, радіолокаційного і оптичного полів, визначенні параметрів руху цілей по даним РЛС та АІС (ЗНО), коригуванні траєкторії руху власного судна із використанням градієнтних процедур та заданого ризику зіткнення, на відміну від існуючих забезпечує автоматичне планування маршруту руху судна та оперативне відображення даних, що дозволяє автоматизувати рутинні операції та скоротити час прокладання маршруту руху судна у 10 разів, скоротити загальний час підготовки до запланованого рейсу на 10%, скоротити дистанцію навігаційного переходу, при цьому зменшити витрати палива на 7%.

5. Розроблено метод оптимального розходження суден у полі ризиків, який, на відміну від існуючих, враховує заданий ризик зіткнення та інтереси усіх учасників операції, що дозволяє науково обґрунтувати розмір зони безпечного розходження, із врахуванням середньоквадратичних значень найбільш суттєвих невизначеностей, зменшити, за рахунок цього, дистанцію розходження та витрати палива під час розходження на 30%, зменшити час виконання маневру розходження суден на 4%.

6. Проведено математичне моделювання процесів планування маршруту та оптимального розходження суден під час руху по маршруту із використанням розроблених процедур та градієнтних методів. Результати моделювання підтвердили працездатність та ефективність розроблених методів, алгоритмічного та програмного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р.
2. Maritime Safety Report 2012-2021. Режим доступу :<https://www.iims.org.uk/marine-safety-report-2012-2021>.
3. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. *Ратифіковано Законом № 1678-VII від 16.09.2014.*
4. Морська доктрина України на період до 2035 року. Затверджена постановою КМУ від 07.10.2009 № 1307 (із змінами, внесеними згідно з постановою КМУ від 18.12.2018 № 1108)
5. С.М. Зінченко. Теоретичні та практичні засади автоматизації процесів керування рухом суден на основі відкритих модульних систем // дисертація на здобуття вченого ступеня д.т.н., Херсонський національний технічний університет, 2021 р.
6. Зінченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.А. Скорочення часу чисельного інтегрування математичної моделі судна у бортовому обчислювачі. *Науковий вісник ХДМА*, 2018, №1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>
7. Zinchenko S.M., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O., Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions. *Науковий вісник ХДМА*, 2019, №2(21), с. 10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015.
8. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateychuk V.M., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O. Automatic Collision Avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, № 4, P. 211-221. DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-20.

9. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., **Mamenko P.P.**, Popovych I.S., Grosheva O.O. Automatic collision avoidance system with multiple targets, including maneuvering ones. *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*, 2019, № 4(96), P. 69-79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79
10. Zinchenko S.M., Mateichuk V.M., Nosov P.S., Popovych I.S., Solovey O.S., **Mamenko P.P.**, Grosheva O.O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2020, Vol. 16, №2, P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009.
11. Zinchenko S.M., Ben A.P., Nosov P.S., Popovich I.S., **Mamenko P.P.**, Mateychuk V.M. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control Systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, № 2, P. 183-195. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19>
12. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Ben A.P., Prokopchuk Y.A, **Mamenko P.P.**, Popovich I.S., Moiseienko V.S, Kruglyj D.G. Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2021, Vol. 2 No. 9 (110). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>
13. **Mamenko P.P.**, Zinchenko S.N., Kobets V.M, Nosov P.S, Popovych I.S. Solution of the task of Optimizing Route with Using the Risk Criterion. In: *Babichev S., Lytvynenko V. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021, vol 77. P. 252-265, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_17.
14. Nosov P., Zinchenko S., Plokhikh V., Popovych I., Prokopchuk Yu., Makarchuk D., **Mamenko P.**, Moiseienko V., Ben A. Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Control processys*, 2021, Vol. 4, No. 3(112), P. 27-35 (SCOPUS)
15. Патент на винахід №123235. МПК G05D 1/08 (2006.01), G05D 1/02 (2020.01), B63H 25/04 (2006.01). Система водіння по маршруту //

Зінченко С.М., Грошева О.О., Матейчук В.М., **Маменко П.П.**, Півоваров Л.А. - Заявка А201903052, заявлено 28.03.2019, опубліковано 03.03.2021, бюл. № 9/2021.

16. Кириченко К.В., Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.** Дослідження мінімізації збитків у випадку неминучого зіткнення суден. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2021)*: Матеріали XII наук.-практ. конф., Ізмаїл, 9-10 грудня 2021р. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/program2021.pdf>

17. **Маменко П.П.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Кириченко К.В. Методи підвищення безпеки судноводіння. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ "ОМА"-2021)*: Матеріали XII наук.-практ. конф., Ізмаїл, 9-10 грудня 2021р. <https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/program2021.pdf>

18. **Pavlo Mamenko**, Serhii Zinchenko, Pavlo Nosov, Kostiantyn Kyrychenko, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi and Vitaliy Kobets. Research of Divergence Trajectory with a Given Risk of Ships Collisions. *2 nd International workshop on computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021)*, Rivne, 5 November, 2021.

19. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., **Mamenko P.P.**, Artemenko A.G. Taking into account the slamming during automatic safe sailing in a storm. *Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021)*: Матеріали 1 міжн. наук.-практ. конф., Херсон, 03-04 листопада 2021р.

20. Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenko P.P.**, Moiseenko V.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Polishchuk V.O. Use of zero movements for adjustment of redundancy structures. *Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021)*: Матеріали 1 міжнародної науково - практичної конференції, Херсон, 03-04 листопада 2021р.

21. **Mamenko P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V., Moiseienko V.S. Solution of the problem of optimizing route with using the risk criterion. *Проблеми сталого розвитку морської галузі*

(PSDMI-2021): Матеріали 1 міжн. наук.-практ. конф., Херсон, 03-04 листопада 2021р.

22. Moiseienko V.S., Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Kyrychenko K.V. Position keeping experiment using LOPRS and DGPS in rough sea. *Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI 2021): Матеріали 1 міжн. наук.-практ. конф., Херсон, 03-04 листопада 2021р.*

23. **Mamenco P.P.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., Mateichuk V.M. Minimization of navigation risk in the problem of vessel diverging. *Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.*

24. Mateichuk V.M., Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., **Mamenco P.P.** Automatic vessel steering in a storm. *Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.*

25. Moiseenko V.S., Zinchenko S.M., Nosov P.S., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M. Improving the reliability of dynamic positioning in the event of shading or wind sensor failure. *Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.*

26. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Modeling the behavior of navigator to improve safety of maritime transport operation. *Actual problems of transport, energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.*

27. Nosov P.S., Zinchenko S.M., **Mamenco P.P.**, Mateichuk V.M., Moiseienko V.S., Kyrychenko K.V. Complex analysis of ECDIS-DATA to increase the safety of marine transport operation. *Actual problems of transport,*

energy, infrastructure safety: Materials of the I International scientific-practical conference, Kherson, 8-11 September, 2021.

28. **P.P. Mamenko.**, S.M. Zinchenko., P.S. Nosov., I.S. Popovych. Solution of the task of optimizing route with using the risk criterion. *Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence (ICDMCI-2021)*: Materials of the International Scientific Conference, Jeleznyi Port, 24-28 May 2021.

29. **P.P. Mamenko.**, S.M. Zinchenko. The use of the risk criterion in the task of optimization of ship divergence trajectories. *Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINT - 2021)*: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 25-27, 2021.

30. S.M. Zinchenko, A.P. Ben, P.S. Nosov, **P.P. Mamenko**, V.M. Mateichuk. Improving the accuracy and reliability of automatic vessel motion control system. *Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT-2020)*: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference, Kherson, May 27-29, 2020.

31. Зінченко С.М., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.М. Використання математичної платформи для оцінки курсу під час маневрування судна. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика*: Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф., Херсон, 11-14 вересня 2019, с. 207 – 209.

32. **Mamenko P.** (2023). Minimization of ships' passing path in the field of risks. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(70). <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276419>

33. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Use of navigations simulators for development and testing ship control systems. *Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S.*, Odessa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 350-355.

34. S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, **P.P. Mamenko**, O.O. Grosheva. Automatic Collision Avoidance with many targets, including maneuvering ones. *Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V.S.*, Odessa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 343-349.
35. Зинченко С.Н., Носов П.С., **Маменко П.П.**, Грошева О.А., Матейчук В.Н. Избыточность по управлению как количественная мера маневренности судна. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019)*: Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 28-30 травня 2019 р., с. 97 – 99.
36. Зинченко С.Н., Носов П.С., Грошева О.А., **Маменко П.П.**, Матейчук В.Н. Управление судном в условиях внешних воздействий. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019)*: Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 28-30 травня 2019 р., с. 177-178.
37. Зинченко С.М., **Маменко П.П.**, Грошева О.О. Планування та реалізація переходу з використанням навігаційного обладнання ходового містка: навч. посіб. Херсон: ХДМА, 2020. 164 с.
38. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за редакцією В.Чимшир/. – Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.
39. Swift A.J. (Captain). Управління командою на навігаційному містку. *Bridge Team Management. A practical guide.* – London: Liberia Nautica Robinson, 1993. – 80p.
40. А.С. Мальцев. Маневрування суден під час розходження. Мальцев А.С., Тюпіков Е.Е., Ворохобін І.І., Сурінов І.Л. -Одеса: НУ «ОМА», 2021. 178 с.
41. В.О. Діордієв. Проблеми та перспективи суднобудівної галузі України у глобальному контексті. http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/10_2018/155.pdf

42. Acejo I., Sampson H., Turgo N., Ellis N., Tang L. (2018) The causes of maritime accident sinthe period 2002–2016, Seafarers International Research Centre (SIRC), Cardiff University, United Kingdom. Availalbe from http://orca.cf.ac.uk/117481/1/Sampson_The%20causes%20of%20maritime%20accidents%20in%20the%20period%202002-2016.pdf.
43. У.Л. Гилка. Виявлення ролі людського фактору в аварійності морського транспорту. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. № 1 (70), 2020. DOI 10.31375/2226-1915-2020-1-31-43
44. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року "(Про приєднання до Конвенції див. Закон N 464/96-ВР від 01.11.96)" { Додатково див. Манільські поправки (896_052) від 25.06.2010 }. <https://xn--80aagahqwyibe8an.com/organizatsiya-morska-mijnarodna/mijnarodna-konventsija-pro-pidgotovku-1978-22057.html>
45. О.М. Мельник, Ю.В. Бичковський. Сучасна методика оцінки рівня безпеки судна та шляхи його підвищення. РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ № 2(9), 2021. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>
46. Шахов А., & Бичковский Ю. Оцінка впливу людського елемента на безпеку морського судноплавства. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2020. № (2 (71)). С. 102–112. <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2020-2-102-112>.
47. Примачов М.Т. Морська транспортна індустрія і системна економічна безпека. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2021. 2(75), 5-15. URL: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2021-2-5-15>
48. Review of Maritime Transport 2020. UNCTAD/RMT/2020. ISBN 978-92-1-112993-9. United Nations Publications 300 East 42nd Street New York. un.org/publications.
49. Nina Rizun, Yurii Taranenko. Simulation Model of the Decision-Making Support for Human-Machine System Operators. 7th International Conference on Intelligent Computing and Decision Support System. 2016. pp.81-88

50. Jurdziński M. (2020) The Need to Update the Navigation Curriculum as a Consequence of Adoption the e-Navigation Model. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 3, doi:10.12716/1001.14.03.03, pp. 541–544.
51. Maltsev A., & Surinov I. (2021). Improving the navigational preparation of a bridge crew for entering/leaving a port, including activities in case of emergency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (111)), 42–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235092>. Scopus
52. Бідюк П.І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніюк. – Київ: ННК «ІПСА», 2010.–340 с.
53. Ногин В.Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето в терминах функций выбора / В.Д. Ногин // Методы поддержки принятия решений. – 2005. – С. 43–53.
54. Камишин В.В., Рева О.М. Методика організації особистісно-орієнтованого навчання : посібник . – К., 2013. – 188 с.
55. Мальцев А.С. Системы принятия решений по управлению движением судна, монография/ А.С. Мальцев, А.П. Бень.– Херсон.: ХГМА, 2019. -240 с.
56. Бичковський Ю.В., Мельник О.М. (2022). Роль та місце людського елементу у ситуації навалу або зіткнення судна з причалом. *Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки* 33(72) № 1. С. 270–276.
57. Мальцев А.С. Навигационная система гарантированного безопасного управления маневрированием судов без экипажа.//*Научный вестник ХДМА*. - Херсон: ХДМА, 2021. -№1(24). -С. 38-56.
58. Maltsev A. Improving the methodology of planning the voyage cycle of a ship. Modern directions of scientific research development. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Bo science Publisher, Chicago, USA. 2022.pp.330-349. URL:<https://sci-conf.com.ua/viii-mezdunarodnaya-nauchno-practicheskaya-konferentsiya-modern-directions-of-scientific-research-development-26-28-yanvaryaya-2022-goda-chikago-ssha-arhiv/>.

59. Покотілов І.П. Критерії вибору програмних продуктів для проектування перевезень морським транспортом / І.П. Покотілов // Сучасні інформаційні технології в економіці та управлінні підприємствами, програмами та проектами // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції. – Харків, 2011. – С. 54-56.
60. Maltsev A., Surinov I., Shumilova K. Selection of waypoints for planning the ship's voyage cycle // International scientific innovations in human life. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. 2022. Pp. 230-242. URL: <https://sci-conf.com.ua/xi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-11-13-maya-2022-goda-manchester-velikobritaniya-arhiv/>
61. Титов А.В. Перспективи технологічного розвитку і впровадження безкіпажних суден / А. В. Титов, Л. Баракат./ Морські інтелектуальні технології. 2018. № 1-3(41). С. 94–103.
62. M.A. Ramos, Christoph A. Thieme, Ingrid B. Utne, A. Mosleh. Human-system concurrent task analysis for maritime autonomous surface ship operation and safety. Reliability Engineering & System Safety. Volume 195, March 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106697>
63. O. Melnyk, O. Onishchenko, S. Onyshchenko, A. Voloshyn, Y. Kalinichenko, O. Rossomakha. Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (Trans NAV), Volume 16 Number 3 September 2022, DOI: 10.12716/1001.16.03.18
64. А. Г Писанко., В.І. Богом'я., Л.Л. Пліта. (2021) Аналіз систем керування судном та особливостей їх експлуатації. *Vodnij transport*, Nr. 1(32) pp.36–41. <http://dx.doi.org/10.33298/2226-8553.2021.1.32.05>.
65. Navi-Trainer Professional 5000 v5.35 Bridge Manual. TransasMIPLtd. 2014.
66. IMO, Model Course 1.27 on Operational Use of Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), International Maritime Organization, London. -

2010. - 100 p.

67. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за ред. В. Чимшира / Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.

68. Navi-Sailor 4000 ECDIS, Version 2.00.323. User Manual. - Transas Marine International. - 2011. - 453 p.

69. Navi-Planner 4000, Version: 2.00.344. User Manual. - Transas MIP Ltd. - 2013. - 235 p.

70. Ю.Г. Якусевич, В.В. Тришин, З.Я. Дорофєєва. Побудова навігаційної системи судна на основі сучасних інформаційних технологій. Кібернетика та системний аналіз № 4(70) 2021. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.70.12>

71. ECDIS. What you need to know. 2nd edition. – A Jeppesen Marine publication,-2011. - 112 p.

72. Г.В. Шапіро, О.О. Аросланкін, Є.Є. Постніков. Формування інформаційної моделі надводної обстановки для автоматизації процесів судоводіння. Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт. Том 3 №65 (2021). Системи управління, навігації та зв'язку. doi: 10.26906/SUNZ.2021.3.037

73. Доронін В.В. Особливості моделювання та оцінювання діяльності оператора ECDIS. Водний транспорт. - 2013. - Вип. 2. - С. 24-32. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2013_2_6

74. Deng, F.; Jin, L.; Hou, X.; Wang, L.; Li, B.; Yang, H. COLREGs: Compliant Dynamic Obstacle Avoidance of USVs Based on the Dynamic Navigation Ship Domain. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 837. [Google Scholar] [CrossRef]

75. COLREGS - International Regulations for Preventing Collisions at Sea. Lloyd's Register Rulefinder 2005 – Version 9.4. // <http://www.jag.navy.mil/distrib/instructions/COLREG-1972.pdf>.

76. Мальцев А.С. Динамічне позиціонування судна при відхиленнях параметру управління, величина якого порівняна з похибками його

визначення// Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. – № 1 (20). – С. 44-54.

77. Дакі О. А. Метод розрахунку критерію чутливості контролю радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2019. № 2(35). С. 184-89. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.24>.

78. Radar navigation and ship collision avoidance. Nautical almanac. <https://www.nauticalalmanac.it/en/navigation-astronomy/radar-navigation-maneuvering-board.html>.

79. А.В. Петровский, А.П. Бень, В.Г. Ляшенко, І.В. Паламарчук. Концепція системи підтримки прийняття рішень для управління маневром судна у каналах. Том 1 № 18 (2018): Науковий вісник Херсонської державної морської академії.

80. Alex Pipchenko. Radar Plotting or... Do we really understand what ARPA does? – 2018. // <https://learnmarine.com/blog/Radar-Plotting-or...-Do-we-really-understand-what-ARPA-does/>

81. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении. / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(18), Issue: 158, 2018.- С. 41-46. <https://doi.org/10.31174/NT2018-158VI18-11>

82. Пасечнюк С.С. Использование маневра снижения скорости одного из судов при внешнем управлении процессом расхождения/ Пасечнюк С.С.// East European Science Journal, №5 (33), 2018, part 1. - С. 25 - 30.

83. Бурмака И. А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, М. А. Кулаков, Г. Е. Калиниченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. - 2017. - № 2. - С. 4-13. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdm_i_2017_2_3

84. Tor A. Johansen, Andrea Cristoforo & Tristan Perez. Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control. IFAC, 2016.
85. Мальцев А.С. (2022, April). Побудова криволінійних траєкторій маневрування методом відрізків. In The 9 th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (April 6-8, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2022. 580 p. (p. 152).
86. Shen H., Hashimoto H., Matsuda A. et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning. Applied ocean research journal, 2019, Vol.86, P.268-288. doi: 10.1016/j.apor.2019.02.020.
87. Enmei Tu, Guanghao Zhang, Lily Rachmawati, Eshan Rajabally, Guang-Bin Huang. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Volume: 19, Issue: 5, May 2018). Pp/ 1559 – 1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551
88. Huang Y., Chen L., Gelder P. Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collision at sea. Ocean Engineering journal, 2019, Vol. 173, P.142-156. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.053
89. Lisowski J. (2019). Multi-criteria Optimization of Multi-step Matrix Game in Collision Avoidance of Ships. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 13(1):125-131. DOI: 10.12716/1001.13.01.12
90. J. Lisowski. The Safe Control Sensitivity Functions in Matrix Game of Ships. TransNav 2018; 12 (3) : 527-532; DOI: 10.12716/1001.12.03.11
91. J. Lisowski. Dynamic Games Methods in Synthesis of Safe Ship Control Algorithms. Journal of Advanced Transportation Volume 2018, Article ID 7586496, 8 pages <https://doi.org/10.1155/2018/7586496>
92. Lisowski J. & Mohamed-Seghir M., Safe ship control methods based on fuzzy set theory. Polish Journal of Environmental Studies. 17(3C), pp. 55-58, 2008.

93. Lisowski J. The comparison of safe control methods in marine navigation in congested water. (2009). *TransNav* 3 (2) : 163-172. ISSN:2083-6473 (print), 2083-6481 (online) GICID:71.0000.1500.1595
94. Lisowski J. Sensitivity of Safe Trajectory in a Game Environment on Inaccuracy of Radar Data in Autonomous Navigation. *Sensors* 2019, 19(8), 1816; <https://doi.org/10.3390/s19081816>
95. J. Lisowski. (2016). Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10, no. 2, pp. 223–228,. DOI: 10.12716/1001.10.02.05
96. Lisowski J., Mathematical modeling of a safe ship optimal control process. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(1), pp. 68-75, 2005.
97. Lisowski, J. (2016). The Sensitivity of State Differential Game Vessel Traffic Model. *Polish Maritime Research*, vol. 23, no. 2, pp. 14–18 [Online]. DOI: 10.1515/pomr-2016-0015.
98. Lisowski J. MULTI-CRITERIA OPTIMISATION OF MULTI-STAGE POSITIONAL GAME OF VESSELS. *Polish Maritime Research* 1 (105) 2020 Vol. 27; pp. 46-52 10.2478/pomr-2020-0005
99. J. Lisowski. (2013). Sensitivity of computer support game algorithms of safe ship control. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. vol. 23, no. 2, pp. 439–446. DOI: 10.2478/amcs-2013-0033
100. J. Lisowski and A. Lazarowska. (2013). Te radar data transmission to computer support system of ship safety. *Solid State Phenomena*, vol. 196, pp. 95–101. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.196.95
101. Lisowski J. The optimal and safe ship trajectories for different forms of neural state constraints. *Solid State Phenomena* Vol. 180 (2012) pp 64-69 (2012) *Trans Tech Publications*, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.180.64
102. Lisowski, J. (2012). Game control methods in avoidance of ships collisions. *Polish Maritime Research*. vol. 19, no. SPEC. ISSUE, pp. 3–10 [Online]. DOI: 10.2478/v10012-012-0016-4.

103. Lisowski, J. (2014). Comparison of Dynamic Games in Application to Safe Ship Control. Polish Maritime Research, vol. 21, no. 3, pp. 3–12 [Online]. DOI: 10.2478/pomr-2014-0024.
104. Lisowski J.(2014).Game Strategies of Ship in the Collision Situations. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. [http//w.w.w.transnav.eu](http://w.w.w.transnav.eu).DOI: 10.12716/1001.08.01.08
105. Lisowski J. Cooperative and non-cooperative game control strategies of the ship in collision situation. TransNav: Int. J. Marine Nav. Safe. Sea Transport. 12(1) (2018), 83-91. DOI: 10.12716/1001.12.01.09
106. Lisowski J.(2014). Game Strategies of Ship in the Collision Situations. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. [http//w.w.w.transnav.eu](http://w.w.w.transnav.eu).DOI: 10.12716/1001.08.01.08
107. Lisowski J. Optimization methods in maritime transport and logistics. Polish Maritime Research 4 (100) 2018 Vol. 25; pp. 30-38 10.2478/pomr-2018-0129
108. Lisowski J. Multistage Dynamic Optimization with Different Forms of Neural-State Constraints to Avoid Many Object Collisions Based on Radar Remote Sensing. Remote Sens. 2020, 12, 1020; doi:10.3390/rs12061020
109. Lisowski J. Game Control Methods Comparison when Avoiding Collisions with Multiple Objects Using Radar Remote Sensing. Remote Sens. 2020, 12(10), 1573; <https://doi.org/10.3390/rs12101573>
110. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Расхождение с маневрирующими целями. Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 36-43, 2017. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>.
111. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateychuk V.M., Mamenko P.P., Grosheva O.O. Automatic Collision Avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. RadioElectronics, ComputerScience, Control, 2019.-№4.-P211-221.DOI:10.15588/1607-3274-2019-4-20. <http://ric.zntu.edu.ua/article/view/194283/194392>.
112. Патент на корисну модель UA 129699 U №129699, МПК (2018.01) B63В 49/00. Спосіб розходження з небезпечними цілями / С.М. Зінченко,

В.Г. Ляшенко, В.М. Матейчук. - заявка № U 2018 04610, заявлено 26.04.2018, опубліковано 12.11.2018, Бюл.№ 2.

113. Патент на корисну модель № 137692. МПК (2006): В63В 49/00. Спосіб вибору оптимальних параметрів розходження з небезпечними цілями / С.М. Зінченко, В.М Матейчук, В.Г Ляшенко. - Заявка U201901114, заявлено 04.02.2019, опубліковано 11.11.2019, Бюл. № 21/2019

114. Бурмака И.А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена / Бурмака И.А. // Austria - science, Issue: 23, 2019. – С. 36 – 43; база(и) Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals).

115. Main Aspects of a Maritime E-Navigation Project. URL: https://www.researchgate.net/publication/336802337_Main_Aspects_of_a_Maritime_E-Navigation_Project (дата звернення 29.01.2022).

116. Патент 149191 UA. МПК G08G 3/02(2006.01). Індикатор відхилення осі бура. /Мальцев А.С., Сурінов І.Л., Бень А.П. Заявник Херсонська державна морська академія. - № U 2020 07925; заявлено 11.12.2020, опубліковано 27.10.2021, Бюл. № 43.

117. Ф. Гриффитс. Внешние дифференциальные системы и вариационное исчисление. Б.: Мир, 1986.- 360с.

118. Кондрук Н.Е. Багатокритеріальна оптимізація лінійних систем: навч. посібник / Н.Е. Кондрук, М.М. Маляр – Ужгород: РА “АУТДОР-ШАРК”, 2019. – 76 с.

119. Lisowski, J. Application of Fuzzy Set Theory in the Safe Ship Control Process. IFAC Proceedings Volumes (IFAC Papers-OnLine) 31(30):275-279. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38452-5

120. Smierzchalski R. and Michalewicz Z. (2000). Modelling of a ship trajectory in collision situations at sea by evolutionary algorithm. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 4(3), 227–241. <https://doi.org/10.1109/4235.873234>.

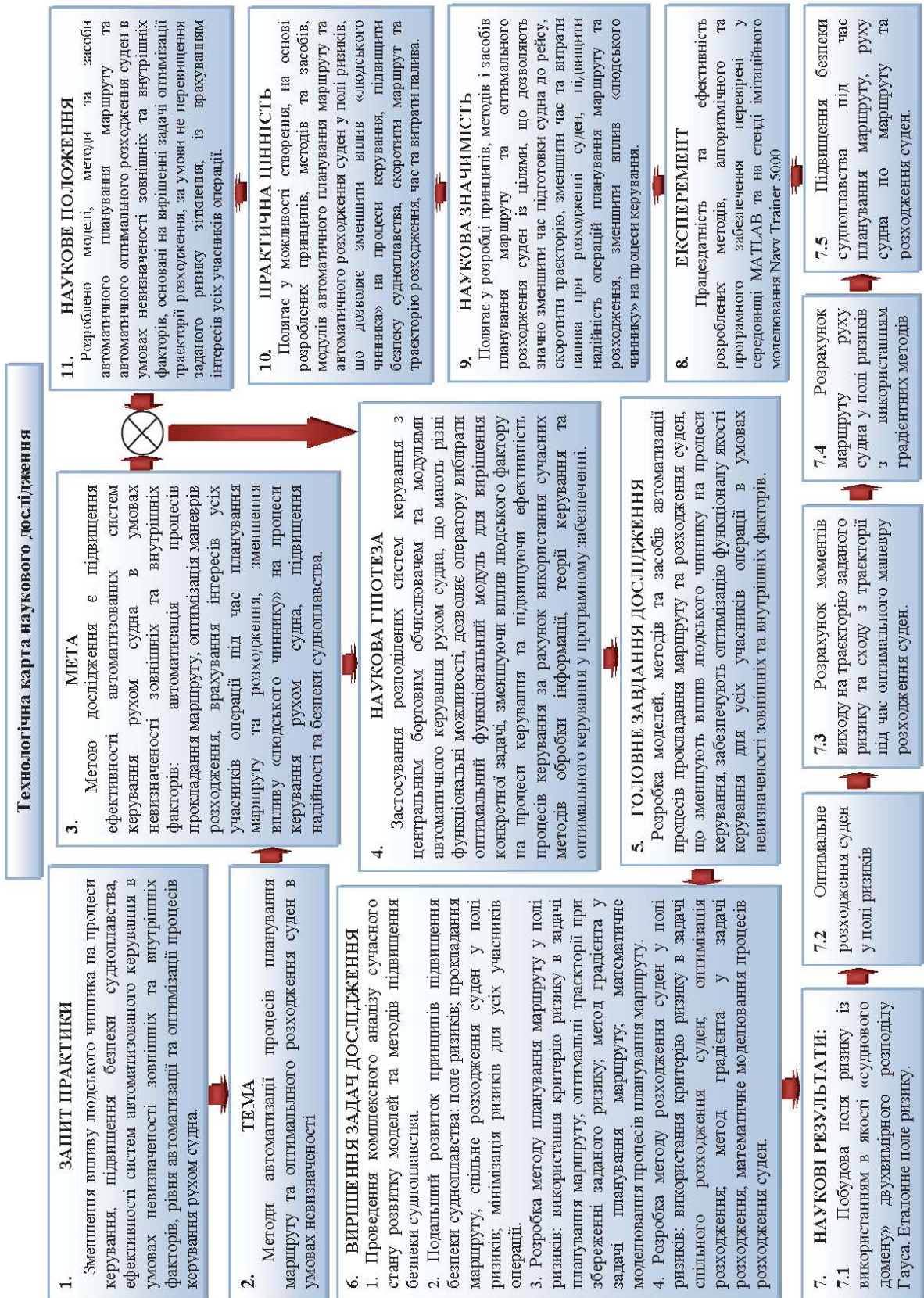
121. E.R. Avakov, G.G. Magaril-Il'yaev, V.M. Tikhomirov. Lagrange's principle in extremum tasks with constraints, Russian Academy of Sciences (DoM), London Mathematical Society, Turpion Ltd. Russian Mathematical Surveys, Volume 68, Number 3 (2013).
122. Shu Liang, Xianlin Zeng, Yiguang Hong, Distributed Nonsmooth Optimization With Coupled Inequality Constraints via Modified Lagrangian Function, IEEE Transactions on Automatic Control (Volume: 63, Issue: 6, June 2018), DOI: 10.1109/TAC.2017.2752001
123. Walsh G.R. (1975). "Saddle-point Property of Lagrangian Function". Methods of Optimization. New York: John Wiley & Sons. pp. 39–44. ISBN 0-471-91922-5.
124. Tabak, Daniel; Kuo, Benjamin C. Optimal Control by Mathematical Programming. Published by Prentice Hall, (1971), Englewood Cliffs, NJ, 1971. ISBN 10: 0136381065 / ISBN 13: 9780136381068.
125. Hanson M.A. (1999). "Invexity and the Kuhn-Tucker Theorem". J. Math. Anal. Appl. 236 (2): 594–604. doi:10.1006/jmaa.1999.6484.
126. A. Engau and D. Sigler.(2020). Pareto solutions in multicriteria optimization under uncertainty, European Journal of Operational. doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.040.
127. Harold P. Benson, Multi-Objective Optimization: Pareto Optimal Solutions, Properties, DOI: https://doi.org/10.1007/0-306-48332-7_315.
128. V.I. Zhukovskiy, M.E. Alukvadze. Chapter 4 Geoffrion Optimality. Mathematics in Science and Engineering, Volume 193, 1994, Pages 131-167. doi.org/10.1016/S0076-5392(08)61972-4.
129. Li, X.R.; Jilkov, V.P. Survey of maneuvering target tracking. Part I. Dynamic models. Aerosp. Electron. Syst. 2003, 39, 1333–1364.
130. Engwerda J.C. LQ Dynamic Optimization and Differential Games, John Wiley and Sons: West Sussex, pp. 359-426, 2005.
131. Klee H., Allen R..Simulation of dynamic systems with MATLAB and SIMULINK / H. Klee, R. Allen // Tailor & Francis Group, LLC. - 2011.

132. T. Kalinichenko, Y. Kalinichenko & O. Tymoshchuk. (2022). Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*, 35-37. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002665>.
133. Y. Kalinichenko. Monograph // PC TECHNOLOGY CENTER. Theory and methods for calculating the inertial-braking characteristics of a ship. December 28, 2020 // DOI: 10.15587/978-617-7319-30-5.
134. J.M. Sanz-Serna. Symplectic Runge–Kutta schemes for adjoint equations, automatic differentiation, optimal control, and more. *SIAM Review*, 58(1):3–33, 2016.
135. L.S. Pontryagin, V.G. Boltayanskii, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko, "The mathematical theory of optimal processes" , Wiley (1962) (Translated from Russian).
136. Chaturvedi D. Modeling and simulation of systems using MATLAB and SIMULINK/ D. Chaturvedi // Taylor & Francis Group, LLC. - 2011.
137. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 114, 91-101. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>
138. Fujii, Y. and Tanaka, K. (1971). Traffic capacity. *The Journal of Navigation*, 24, 543–552. CrossRefGoogle Scholar
139. Fujii, Y. (1983). Integrated study on marine traffic accidents. *IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures*, Copenhagen, 91–98. Google Scholar
140. Kang Zhou, Jihong Chen and Xiang Liu. Optimal Collision-Avoidance Manoeuvres to Minimise Bunker Consumption under the Two-Ship Crossing Situation. *The Journal of Navigation* (2018), 71, 151–168. c The Royal Institute of Navigation 2017 doi:10.1017/S0373463317000534.

141. Lisowski J. Synthesis of a Path-Planning Algorithm for Autonomous Robots Moving in a Game Environment during Collision Avoidance. *Electronics* 2021, 10(6), 675; <https://doi.org/10.3390/electronics10060675>
142. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Расхождение с маневрирующими целями. *Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 36-43, 2017.* <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>.
143. Lisowski J. Review of Ship Collision Avoidance Guidance Algorithms Using Remote Sensing and Game Control. *Remote Sens.* 2022, 14(19), 4928; <https://doi.org/10.3390/rs14194928>
144. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system. *Journal of Archives of Transport*, 17, pp. 133-147, 2005.
145. A. Aleksishin, A. Vagushchenko, O. Vagushchenko, Y. Kalinichenko. Improvement of the Anticollision Method "Velocity Obstacle" by Taking Into Consideration the Dynamics of an Operating Vessel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 6. #3 pp.14-19/. 2019 . DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185319

ДОДАТКИ

Додаток А. Технологічна карта наукового дослідження



Додаток Б.

Програмне забезпечення модулів автоматичного планування маршруту та розходження суда із небезпечними суднами цілями у полі ризиків

У Додатку Б приведені лістинги програмного забезпечення MATLAB для математичного моделювання процесів автоматичного планування маршруту і оптимального розходження із небезпечними цілями у полі ризиків, зокрема:

- лістинг програми побудови поля ризиків району плавання (Б.1);
- лістинг процедури згладжування та обмеження зображення (Б.2);
- лістинг процедури побудови домену (Б.3);
- лістинг процедури афінного перетворення (Б.4);
- лістинг програми суміщення навігаційних полів ризиків і полів ризиків корабельних доменів (Б.5);
- лістинг процедури прокладання маршруту (Б.6);
- лістинг програми накладання траси на поле ризиків (Б.7);
- лістинг програми оптимального розходження (Б.8).

Б.1. Лістинг програми побудови поля ризиків району плавання

```
script; clc; echo on; diary off;

echo off; tic;

A=imread('More1.jpg');           % введення зображення
DA=A(1:650, 400:1100);          % вибір області
Xmin=0; xmax=650; ymin =400; ymax=1100;
xy=[xmin, xmax, ymin, ymax];

D1=(im2double(DA));             % встановлення формату даних
D2=Czona(D1, D2,xy);            % побудова поля ризиків
Figure, imshow(D2); axis off;   % зображення поля ризиків
end;
```

Б.2. Лістинг процедури згладжування та обмеження зображення

```

function D2=Czona(D1,D2,xy);
n=xy(2)-xy(1); m=xy(4)-xy(3);           % межі зони
% збереження зображення
D2(1:n,1:m)=0;D2=D1; F(1:4,1:4)=0;
F=(1/16)*[1 1 1 1;1 1 1 1;1 1 1 1;1 1 1 1];
%-----
D2=filter2(F,D1)/2;                       % сгладжування
alfa=mean(mean(D2));                       % оцінка середнього
%----- Установка границь -----
for i=1:n; for j=1:m;
if D2(i,j)>=alfa; D2(i,j)=1;end;
end; end;
%-----
D2=filter2(F,D2)/2;                       % згладжування
%----- Вихід -----

end;

```

Б.3. Лістинг процедури побудови домену

```

function A0=Domen(A0,xy);                   % вихідне поле домену
n=xy(2)-xy(1); m=xy(4)-xy(3);             % межі зони
AS(1:n,1:m)=0;                             % робочий масив
mx=n/2;my=m/2;                             % розміри полей
sx=30000;                                   % оцінка розкиду
for i=1:n; for j=1:m;
AS(i,j)=exp(-((i-mx)^2)/sx+((j-my)^2)/sx);
end;end;
A0=AS;                                     % формування вихідного масиву
end;

```

Б.4. Лістинг процедури афінного перетворення

```

function A0=Sdomen(A0, xy, pdom);          % вихідне поле домену
n=xy(2)-xy(1); m=xy(4)-xy(3);           % межі зони

```

```

M(1,1)=cos(pdom(1));M(1,2)=sin(pdom(1)); % : матриця
M(2,1)=-sin(pdom(1));M(2,2)=cos(pdom(1));% : афіни
Sig=[pdom(4)/100 0;0 pdom(5)/100]; % матриця дисперсій
Imxy=[pdom(2);pdom(3)]; % вектор координат
%-----
for i=1:n; for j=1:m;
IC=[i;j];ICR=Sig*M*(IC-Imxy); % обчислення аргументу
A0(i,j)=exp(-ICR'*ICR); end;end; % обчислення домену

end;

```

Б.5. Лістинг програми суміщення навігаційних полів ризиків і полів ризиків корабельних доменів

```

script; clc; echo on, diary off;

echo off;tic;
A = imread('More1.jpg'); % введення зображення
DA=A(1:650,400:1100); % введення області
A0=DA; D2=DA;
xmin=0; xmax=650; ymin=400; ymax=1100;
n=xmax-xmin; m=ymax-ymin; % межі зони
xy=[xmin, xmax, ymin, ymax];
D1=(im2double(DA)); % встановити формат
D2=Czona (D1, D2, xy); % побудувати поле ризиків
A0=Domen (A0, xy);
betag=-45; beta=6.28*betag/360; % курсовий кут
x0=n/2; y0=m/2; % координати домена
msx=10; msy=2; % масштаби по осях
pdom=[beta, x0, y0, msx, msy] % вектор параметрів
A0=Sdomen(A0, xy, pdom); % вихідне поле домену
contour(i, j, A0);
end;

```

Б.6. Лістинг процедури прокладання маршруту

```

function A0=Stras(A0, xy, pdomk); % вихідне поле домену

```



```

n=xy(2)-xy(1); m=xy(4)-xy(3); % межі зони
Sig=[pdomk(5)/100 0;0 pdomk(6)/100]; % матриця дисперсій
Imxy=[n/2; m/2]; % вектор координат
%A0(1:n,1:m)=0;
kj=m/2-m/(2*pdomk(6)); % центр по j
j0=fix(1+kj); % нижня межа j
j1=fix(m-kj); % верхня межа j
dj=(j1-j0)/2; % зсув центру
i=1; for j=j0:j1; % перетин по j
IC=[n/2;j];ICR=Sig*(IC-Imxy); % обчислення перетину
A0(1,j)=exp(-ICR'*ICR); end; % домена
kk=(pdomk(4)-pdomk(3))/(pdomk(2)-pdomk(1)); % тангенс курсу
for i=pdomk(1):pdomk(2);
for j=j0:j1;jj=j-j0+1;ii=i+1-pdomk(1);
j2=fix(pdomk(3)-dj+jj+ii*kk); % перенос перетину
if and((j2<=m),(j2>=0));
if j2==0;j2=1;end; % умови меж
A0(i,j2)=A0(1,j); % по трасі домену
End; end; end;

A0(1:1,1:m)=0; % скидаємо шаблон

end;

```

Б.7. Лістинг програми накладання траси на поле ризиків

```

script; clc; echo on, diary off;

echo off;tic;
A = imread('More1.jpg'); % введення зображення
DA=A(1:650,400:1100); % вибір області
A0=DA; D2=DA;
xmin=0; xmax=650; ymin=400; ymax=1100;
n=xmax-xmin; m=ymax-ymin;% межі зони
xy=[xmin,xmax,ymin,ymax];
D1=(im2double(DA)); % встановити формат
%D2=Czona(D1,D2,xy); % побудувати поле ризиків

```

```

A0=Domen(A0,xy); % поле домена
betag=0;beta=6.28*betag/360; % курсовий кут
x0=n/2; y0=m/2; % координати домена
msx=1;msy=1; % масштаби по осях
pdom=[beta,x0,y0,msx,msy] % вектор параметрів
%A0=Sdomen(A0,xy,pdom); % вихідне поле домену
t=1
%j=1:n;i=1:m;surfl(A0);shading interp;
%----- Поле ризику елемента траєкторії -----
A0(1:n,1:m)=0;
% ----- поля передачі даних -----
msx=1;msy=4; % масштаби по осях
xn=10; % початок траєкторії x
xk=400; % кінець траєкторії x
yn=100; % початок траєкторії y
yk=400; % кінець траєкторії y
kk=(yk-yn)/(xk-xn);
pdomk=[xn,xk,yn,yk,msx,msy]; % вектор параметрів
A0=Stras(A0,xy,pdomk); % поле ризиків траси
%----- графік -----
j=1:n;i=1:m;surfl(A0);shading interp;
t=2
%-----
betag=40; % курсовий кут градуси
beta=6.28*betag/360; % курсовий кут в радіанах
x0=0; y0=0; % координати домена
msx=1;msy=1; % масштаби по осях
pdom=[beta,x0,y0,msx,msy] ; % вектор параметрів
A0=Afinat(A0,xy,pdom); % аффіне перетворення
%-----
%i=1:n;j=1:m;
% contour(i,j,A0);
%j=1:n;i=1:m;surfl(A0);shading interp;
end;
Поле ризику елемента траєкторії

```

```

%----- Поле ризику елемента траекторії -----
A0(1:n,1:m)=0;A11=A0;
% ----- поля передачі даних -----
% pdomk(1) початок траекторії x
% pdomk(2) кінець траекторії x
% pdomk(3) початок траекторії y
% pdomk(4) кінець траекторії y
% pdomk(5) масштаб по x
% pdomk(6) масштаб по y
%-----
DK=[100 300 250 400 1 10;
300 440 400 150 1 10;
440 540 150 300 1 10]; % матриця прокладки
%-----
for nk=1:3;
for j3=1:6; pdomk(j3)=DK(nk,j3);end;
A0=Stras(A0,xy,pdomk); % поле ризиків траси
A11=A11+A0;
end;
%----- графік -----

j=1:n;i=1:m;surfl(A0);shading interp;

```

Б.8. Лістинг програми оптимального розходження

```

script

clc;echo on, diary off;echo off;tic;hold on
nm=400; % Встановлення кадру
A=zeros(nm,nm); % Поле функції ризику цілі
C=zeros(nm,nm); % Поле траекторій операції
B=zeros(nm,nm); % Поле власної траекторії
D=zeros(nm,nm); % Робоче поле траекторій операції
av=5; % Перша вісь еліпсу ризику
bv=10; % Друга вісь еліпсу ризику
dk=30; % Крок траекторії
for k=1:1;

```

```

e=av^2;rv=nm/av; s=rv^2; % квадрат радіусу
for i=1:nm-k*dk;x=nm-i;
y=bv*sqrt(s-(x^2)/e)/6+160; % верхня гілка
j=ceil(y); A(j,i+dk)=1;A(300-j,i+dk)=1; % нижня гілка
end;
for i=1:nm;for j=1:nm;
B(i,385)=1; B(150,j)=1; % Курс цілі
end;end;
%---- Побудова ліній рівного ризику -----
for k=1:25;
%----- Зрушуємо лінію рівного ризику на крок -----
for i=1:nm;for j=1:nm-dk*k;D(i,j+k*dk)=A(i,j);end;end;
C=C+D; % Накопичування ліній рівного рівня
%----- Відобразити точку початку операції -----
for ik=1:20;
if dk*k<=369;B(140+ik,25+dk*k)=1;end % Траекторія цілі
if dk*k<=370;B(390-dk*k,375+ik)=1;end % Траекторія цілі
end;end;
%----- Відобразити поле операції -----
C=C+B;i=1:nm;j=1:nm;contour(i,j,C);
end;
% Вихід на початок маневру
%----- Крок траекторії -----
A=zeros(nm,nm); % Поле функції ризику цілі
e=av^2;rv=nm/av; s=rv^2; % квадрат радіусу
x0=385;xe=nm-x0; % Початок траси
y=bv*sqrt(s-(xe^2)/e)/6+160; % верхня гілка
s=rv^2; % квадрат радіусу
dk=30; % Крок траекторії
%----- Початок траекторії -----
in=ceil(y);jn1=ceil(x0);A(in-2:in+2,jn1-2:jn1+2)=3;
i=1:nm;j=1:nm;contour(i,j,A);x0=x0;y0=y;
%----- Будуємо траекторію -----
dy=0;da=3.14/180;a0=da*180; % Відлік курсового кута
%----- Ковзання по лінії рівного ризику-----

```

```

for kk=1:12; sh=1
%-----Розв'язання рівняння ковзання-----
for i=1:100;if sh==1;a0;
beta=a0+da*(i-1)*(6.28/10);rx=dk*cos(beta)+x0;ry=dk*sin(beta)+y0;
xe=nm-rx;y=bv*sqrt(s-((xe+dk*kk+30))^2/e)/6+160;    %верхн гілка
dy=abs(y-ry);gbeta=beta*180/3.14;
if abs(y-ry)<=0.4;in=ceil(ry);if rx<=385;jn=ceil(rx);else jn=385;end;
A(in-5:in,jn-5:jn)=8; sh=0; else; PPP=0; end;
end;end;
%----- Прийняття нових початкових умов -----
a0=beta; x0=rx;y0=ry;end;
%----- Показати трасу -----
i=1:nm;j=1:nm;contour(i,j,A);end;

```

Додаток В

Патент, який захищає наукову новизну:





УКРАЇНА

(18) **UA** (11) **123235** (13) **C2**
 (51) **МПК**
G05D 1/08 (2006.01)
G05D 1/02 (2020.01)
B63H 25/04 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки: а 2019 03052	(72) Винахідник(и): Зінченко Сергій Миколайович (UA), Грошева Ольга Олександрівна (UA), Матвійчук Вадим Миколайович (UA), Мамонко Павло Петрович (UA), Пішоваров Леонід Абрамович (UA)
(22) Дата подання заявки: 28.03.2019	(73) Володівець (володілці): ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000 (UA)
(24) Дата, з якої є чинною права інтелектуальної власності: 04.03.2021	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертами: RU 2223197 C1, 10.02.2004 US 6172324 A, 15.12.1992 US 6964046 B2, 07.02.2006 US 4602668 A, 08.09.1987 Вагущенко П. П. Системи автоматичного управління данимим судна/ П. П. Вагущенко, Н. Н. Цимбал. - Одеса: Фейкс, 2007. – С. 1, 2, 251-269 US 2015346730 A1, 03.12.2015 US 9039468 B1, 26.05.2015
(41) Публікація відомостей про заявку: 12.10.2020, Бюл.№ 19	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 03.03.2021, Бюл.№ 9	

UA 123235 C2

(54) СИСТЕМА ВОДІННЯ ПО МАРШРУТУ

(57) Реферат:

Винахід належить до області судноводіння, зокрема до автоматичного управління рухом суден по маршруту, у тому числі і при наявності зовнішніх впливів. Системи водіння по маршруту включає задатчик шлюхового кута, супутникову навігаційну систему, інтегратори, суматори, датчик носового руля, привід носового руля, привід кормового руля, датчик кормового руля, датчик кутової швидкості, датчик бокової швидкості. Використання даної системи водіння по маршруту дозволяє, при наявності зовнішніх впливів, знизити витрати пального за рахунок руху судна по маршруту без дрейфу, зменшити кількість спрацювань кормового та носового рулів за рахунок виключення операцій диференціювання сигналів при формуванні управління, підвищити надійність системи за рахунок резервування управління для різних районів плавання і погодних умов.

Додаток Г

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

До разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти «Херсонська державна морська академія»

Акт

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему: **«Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності»** Маменка Павла Петровича

Приватне товариство «Ізмаїльський морський тренажерний центр» «Марін Про Сервіс» засвідчує, що результати дисертаційного дослідження за темою «Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності», старшого викладача кафедри управління судном Херсонської державної морської академії Маменка Павла Петровича, впроваджені в освітній процес курсів підвищення кваліфікації та сертифікаційної підготовки командного складу судноводіїв, особливо у частині методу побудови суднового домену із врахуванням середньоквадратичних значень невизначених факторів прокладання маршруту, ефективності розходження під час виконання рейсу і як результат, зменшення впливу «людського чинника» на виникнення небезпечних та аварійних ситуацій. Зазначимо, що заслуговує на увагу запропонований метод планування маршруту, полягає у побудові бортового обчислювання поля ризиків з використанням електронних карт, електронних графіків руху суден, радіолокаційного і оптичного пошуків, визначенні параметрів руху цілей по даним РЛС та АІС, що дає можливість мінімізувати траєкторію розходження при заданому ризику зіткнення. Особливо слід підкреслити практичність наукових розробок здобувача, у якому алгоритм побудови оптимальної траєкторії розходження із заданим ризиком орієнтований на сучасні обчислювальні системи і оперує з полями - великими масивами даних.

Директор

ПП «Ізмаїльський морський тренажерний центр»

«Марін Про Сервіс»



О.Паюк

До разової спеціалізованої вченої ради закладу
вищої освіти «Херсонська державна морська
академія»

Акт

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему: **«Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності»** Маменка Павла Петровича

Національною транспортною стратегією України як морської держави, на період до 2030 року та розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 року №430 - р, підкреслено про необхідність впровадження інтелектуальних транспортних систем та систем керування рухом на наземному та водному транспорті. Розробка та практичне застосування відкритих модульних розподілених автоматизованих систем з центральним обчислювачем та розширюваними модулями автоматичного керування рухом суден отримали пріоритетне значення у сучасному суднобудуванні, які кардинально зменшують вплив «людського чиннику» на процеси керування судном, підвищують надійність, безпеку та ефективність судноплавства. Тому дослідження Маменка П.П. за темою «Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності», яке полягає у розробці принципів, моделей і методів автоматизації процесів підготовки судна до рейсу в частині прокладання маршруту, процесів розходження судна під час виконання рейсу, що забезпечує оптимізацію функціоналу якості керування для усіх учасників операції у полі ризиків є актуальною науково - технічною проблемою для морського транспорту.

Кафедрою «Навігації і управління судном» Дунайського інституту НУ «Одеська морська академія» впроваджено в навчальний процес матеріали дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії Маменко П.П. а саме:

- метод побудови сумарного поля ризиків, який полягає у накладанні полів ризиків власного судна, суден - цілей, полів ризиків інших навігаційних небезпек;

- метод алгоритмічного та програмного забезпечення планування маршруту, що полягає у побудові у бортовому обчислювачі поля ризиків з використанням електронних навігаційних карт, електронних графіків руху судна, радіолакаційного і оптичного полів;

- метод оптимального розходження у полі ризиків із однією та багатьма суднами -цілями.

Завідувач кафедри «Навігації і управління судном»

Дунайського інституту

Національного університету

«Одеська морська академія»,

доктор педагогічних наук, професор



О. Б. Даніленко

До разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти Херсонська державна морська академія

Акт

зпровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему: «Методи автоматизації процесів планування маршруту та оптимального розходження суден в умовах невизначеності» Маменка Павла Петровича у освітньому процесі Херсонської державної морської академії.

Кафедра «Управління судном» та кафедра «Судноводіння» Херсонської державної морської академії засвідчують, що матеріали наукових досліджень дисертації Маменка П.П. у частині: методу побудови поля ризику, що полягає у використанні в якості суднового домену двохвимірною розподілу Гауса із середньоквадратичними значеннями невизначених факторів; методу автоматичного прскладання оптимального маршруту, із використанням градієнтних процедур; методу оптимального розходження суден у полі ризиків, що полягає в організації розходження курсом шляхом «козання» по еліпсу заданого ризику цілі; методу підвищення безпеки судноплавства, що полягає у врахуванням інтересів усіх учасників операції використовуються у освітньому процесі Херсонської державної морської академії при складанні освітньої компоненти «Управління судном», «Судноводіння» і «Теорія та практика управління рухом судна». При цьому зазначається що, працездатність і ефективність розроблених методів та достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи підтвержені також на навігаційних тренажерах Navi Trainer 5000 під час проведення лабораторних занять.

Декан факультету «Судноводіння»
д.п.н., професор кафедри
«Управління судном»



Я.А. Нагрибелний

Завідувач кафедри «Управління судном»,
к.т.н., доцент, к. д. п



О.М. Товстокорий

В.о завідувача кафедри «Судноводіння»,
к.т.н., доцент, к. д. п



Д.В. Макарчук

Підписи співробітників кафедри
навігації та морського
інструментального

