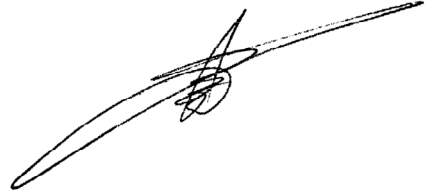


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Бурмака Ігор Олексійович



УДК 656.61.052

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ ЗОВНІШНЬОГО УПРАВЛІННЯ
СУДНАМИ В СИТУАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНОГО ЗБЛИЖЕННЯ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: **Цимбал Микола Миколайович,**
доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту навігації Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Блінцов Володимир Степанович,
проректор з наукової роботи Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

доктор технічних наук, професор
Кондратенко Юрій Пантелійович,
завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем; Чорноморського державного університету ім. Петра Могили Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

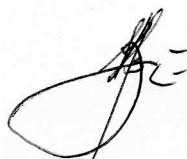
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Тихонов Ілля Валентинович,
в.о. начальника Київської дільниці водних шляхів філії «Днопоглиблювальний флот»
ДП «Адміністрація морських портів України»
Міністерства інфраструктури України, м. Київ

Захист відбудеться 24 лютого 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зала засідань Вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2 та за електронною адресою: <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Автореферат розісланий 22 січня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні транспорт, як складова частина світової економіки і один із факторів її подальшого розвитку, грає одну із головних ролей в житті світової спільноти. Як відомо, основним якісним показником роботи будь якого виду транспорту являється безпека. Особливе значення вона має в торговому мореплаванні з урахуванням того, що морем і річковими водними шляхами перевозиться близько 60% всіх вантажів світового ринку.

Морський транспорт сприяє промислового розвитку більшості держав світу, веде до росту обробної промисловості, скріплює зв'язки між галузями і стимулює регіональні економічну та торгову інтеграції.

Зростання швидкостей та підвищення інтенсивності руху на водних шляхах, збільшення розмірів транспортних суден, плавання в складних навігаційних умовах роблять проблему забезпечення безаварійності судноплавства однією із найбільш пріоритетних і актуальних.

Від її вирішення залежить зменшення кількості аварійних випадків, що сприяє охороні людського життя на морі, зниженню шкоди навколишньому середовищу і майну.

За останні 40 років обсяги перевезень морем зросли майже в чотири рази, причому багатотоннажні судна складають приблизно 80% від світового тоннажу. Тоннаж світового флоту за останнє десятиріччя виріс практично в два рази, а кількість суден - на 40%.

За цей же час світовий флот втратив більше ніж 1200 суден, що складає 1,4% від його загальної кількості. Якщо не враховувати риболовні судна, то на першому місці по втратах ро-ро судна в середньому 0,35% від загальної кількості суден даного типу. Далі суховантажні судна 0,30%, навалювальні судна 0,12% і пасажирські 0,12%. Менше всього втрат серед буксирів і офшорних суден.

Причини втрат суден розподілилися наступним чином: на першому місці затоплення (50%), потім посадка на мілину (20%), пожежа (10%) і зіткнення (7%).

Саме морські багатотоннажні судна близько 20% експлуатаційного часу проводять в прибережних стислих водах, які характеризуються інтенсивним судноплавством та навігаційними перешкодами, що значно ускладнює плавання морських суден в стислих водах і створює передумови для виникнення аварійних ситуацій. Слід зазначити, що в прибережних стислих водах виникає три четверті посадок на мілину і зіткнень суден.

Тому стислі води облаштовуються станціями управління рухом суден, які не тільки контролюють процес судноводіння, а в разі потреби забезпечують зовнішнє управління процесом розходження суден при виникненні ситуації небезпечного зближення.

В період 1995-2015 р.р. станції управління рухом суден були створені в країнах Європи (Норвегія, Фінляндія, Іспанія, Португалія, Італія, Туреччина, Греція, Румунія, Грузія, Кіпр, Мальта), в Азії (Бахрейн, Арабські Емірати, Саудівська Аравія, Малайзія, Індонезія, Філіппіни, Таїланд, Китай, Південна Корея, Сінгапур), в Африці, в Північній, Центральній і Південній Америці, в Австралії і Новій Зеландії. Згідно даним Міжнародної асоціації маячних служб в 2015 році в світі використовувалося понад 500 станцій управління рухом суден.

Не зважаючи на таке широке застосування станцій управління рухом суден по всьому світі і їх сучасне технічне оснащення, вони не забезпечені комп'ютерними інформаційними системами аналізу небезпечності ситуацій зближення суден і, в разі необхідності, визначення стратегії їх розходження.

Вказана обставина і практична відсутність розробок в питаннях зовнішнього управління процесом розходження суден обумовили вибір напрямку дисертаційного дослідження, присвяченого створенню методів оперативного і простого у використанні визначення рівня небезпеки ситуації зближення суден і вибору параметрів стратегії їх розходження, які можуть бути реалізовані в комп'ютерній системі зовнішнього управління процесом розходження суден.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання роботи проводилося згідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008), а також в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувачу належить окремий підрозділ та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), в якій автор дисертації є керівником.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден із розробкою оперативних методів його реалізації.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про існування можливості підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження суден зовнішнім управлінням процесом розходження із використанням методів вибору оптимального маневру.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми одержаних методів визначенням оптимальної стратегії розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, які ураховують форму безпечного домену судна.

Для вирішення головної задачі дисертації була здійснена її декомпозиції на незалежні складові задачі, для чого були використані методи теорії дослідження операцій. Виявилось доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні незалежні складові задачі:

1. Розробка аналітичних методів розрахунку попередження зіткнення суден, яка призначена для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми.

2. Розробка нестандартних аналітичних методів попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна.

3. Дослідження розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження суден, що може бути застосованим як в СУРС, так і на судах при наявності відповідного обладнання, що може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження.

4. Формування групи методів аналітичних розрахунків попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден.

5. Розробка методу перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, який заснований на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, чим досягається безпечно розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи.

6. Формування загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів в стислих районах плавання.

7. Розробка способу урахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Об'єктом дисертаційного дослідження дисертації є процес попередження зіткнення суден.

Предметом дослідження є методи повного зовнішнього управління процесом розходження суден.

Методи дослідження. Рішення поставлених задач було досягнуте за рахунок використання у дисертаційному дослідженні наступних методів:

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- теорії динамічних багатокерованих систем, яка дозволяє описати процес розходження суден з урахуванням декількох незалежних учасників, що управляють процесом, як динамічну систему;
- математичного програмування для коректної постановки задачі вибору оптимального маневру по відповідному критерію;
- математичного аналізу для розв'язання рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих управлінь;
- аналітичної геометрії для формування області неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в створенні аналітичних систем попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримки рішень, та які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що ураховують форму безпечного домену судна.

У дисертаційній роботі:

Вперше:

- започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;
- запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які поділяються на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;
- розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;
- розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;
- для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних

перешкод при визначені меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання;

Одержали подальший розвиток методи урахування третього судна, що заважає, при визначені параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Практичне значення одержаних результатів. Проведеному дисертаційному дослідженню властиве практичне значення, яке полягає у тому, що його результати можуть бути упроваджені на судна в процесі експлуатації, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління процесом розходження судна, та розробниками сучасних навігаційних тренажерів.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 05.03.2020 р.), Херсонською державною морською академією (акт про впровадження від 27.05.2020 р.) для підготовки курсантів та студентів, приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 17.06.2020 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 01.09.2019 р.) та Філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 14.09.2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт про впровадження від 03.06.2020 р.), в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.) та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), у яких автор дисертації брав участь як виконавець у першій ДР та керівник у другій ДР.

Під час виконання дисертаційної роботи наступні патенти були отримані:

- патент на корисну модель № 134690 «Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10;

- патент на корисну модель № 134691 «Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу виконано здобувачем самостійно: проведено інформаційний пошук по темі дисертації та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки судноводіння, по темі дисертаційної роботи здійснено розробку методологічного забезпечення, здобувачем отримано рішення всіх задекларованих складових задач і їх синтезом досягнуто рішення головної задачі дисертації, ним також формалізовані алгоритми, які необхідні для розробки комп'ютерної імітаційної програми, та впроваджені результати роботи в виробничий процес.

З наукових праць, опублікованих ним у співавторстві, в дисертаційній роботі використані лише ті положення, які належать автору особисто: формування принципів локально-незалежного і повного зовнішнього управління [1], структура стандартної та екстреної стратегій розходження [24], формалізація взаємодії суден при розходженні в разі його зовнішнього управління [25], методи вибору маневру розходження використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден [26, 32], концепція полікритеріального управління процесом судноводіння [5], характеристика специфіки управління суднами в стислих водах [7], обробка експериментальних даних по поворотності судна [8, 23], урахування динаміки судна при розрахунках параметрів повороту судна [9], визначення параметрів динамічної моделі поворотності судна по натурним спостереженням [10], формалізація взаємодії суден при компенсації зовнішнього збурення [12], урахування динаміки судна при маневруванні в стислих водах [13], процедура оцінки моменту часу попадання судна в ситуацію надмірного зближення [27], формування області курсів суден, які забезпечують безаварійне розходження [14], стратегія керування групою суден в ситуації небезпечного зближення [17, 22], процедура формування маневру розходження трьох суден зміною курсів [16, 28], залежність точності обсервації від суттєвих факторів [29, 51], спосіб вибору вектору оптимального управління для розходження суден [30, 59], вплив надмірних вимірювань на точність координат [15, 19], формалізація групи суден в разі їх зовнішнього керування [39], методи керування суден при небезпечному зближенні [21, 33], використання моделей оберտального руху при описанні повороту [20], процедури формування областей небезпечних курсів і швидкостей [36], характеристика методів попередження зіткнення зовнішнім управлінням

процесом розходження [39], формування і використання областей неприпустимих значень параметрів руху суден [34, 40], стратегія вибору сумісної зміни параметрів руху суден [18, 60], застосування електронних карт для попередження зіткнення суден [45], забезпечення безпечних поворотів судна в прибережному плаванні [46], вдосконалення технологій управління суднами в районах контролю СУРС [48], формування маневру розходження декількох суден зміною курсів [49, 50], процедура визначення маневру розходження за допомогою області небезпечних курсів [52, 53], спосіб розрахунку меж швидкостей [54, 55].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях: VI «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений» (Севастополь, 2-4 жовтня 2013 р.), науково-технічна конференція «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Одеса, 19-20 листопада 2013 р.), науково-технічна конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні» (Одеса, 18-19 листопада 2014 р. та 19-20 листопада 2015 р.), Всеукраїнські науково-технічні конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 20-22 травня 2015 р., 17-18 травня 2017 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), VI, VII, VIII, IX, X Міжнародні науково - практичні конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014, 2016, 2017, 2018)» (Херсон, 26-28 травня 2014 р., 26-28 травня 2015 р., 24-26 травня 2016 р., 23-25 травня 2017 р., 29-31 травня 2018 р.), науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р., 15-16 листопада 2018 р.), The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20) (Tokyo, Japan. 30 October – 1 November 2019).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 62 наукові праці (з них 20 одноосібно), в тому числі: включених до Переліку наукових фахових видань України - 15 статей [3-13, 16, 17, 22, 23], 1 стаття проіндексована у базах даних Scopus [20], в 3 монографіях [1, 2, 25]; 8 статей у вітчизняних наукових періодичних виданнях [27-32, 36, 37]; 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію [14, 15, 18, 19, 21], в зарубіжних наукових виданнях 10 наукових статей [33-36, 38-45] та 2 монографії [24, 26]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 18 доповідей [35, 46-62].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (226 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 510 сторінок та містить 273 рисунків, зокрема: 270 сторінок основного тексту, 26 сторінок списку використаних джерел, 214 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Вступ роботи містить характеристику актуальності теми дисертації, зв'язок її з програмами наукових досліджень, визначено мету, сформульовано головну та виділено складові незалежні задачі дисертаційного дослідження, обґрунтована його наукова новизна та показане практичне значення дисертаційної роботи.

У **першому розділі** на базі огляду літературних джерел проведений аналіз основних напрямів вирішення проблеми зниження аварійності суден шляхом забезпечення безпеки судноводіння.

Встановлено, що основними напрямками рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння є розробка методів попередження зіткнень суден у прибережних районах плавання, моделювання руху судна при плаванні в стислих районах, що сприяє їх більш ефективному і безпечному плаванню, та забезпечення точності контролю місця судна і оцінка безпеки судноводіння в стислих умовах.

Вітчизняні вчені Аксютін Л.Р., Кондрашихін В.Т., Ворбйов Ю.Л., Вагущенко Л.Л., Мальцев А.С., Цимбал М.М. та іноземні вчені Фрейдзон І.Р., Lisowski J., Hornauer S, Statheros T. зробили значний внесок в рішення зазначених проблем, і аналіз їх досліджень показав, що центральним напрямом рішення проблеми підвищення безпеки судноводіння є вдосконалення методів попередження зіткнень суден в ситуаціях їх небезпечних зближень.

В розділі обґрунтовано основний напрям дисертаційного дослідження, яке присвячене подальшому розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден та розробці оперативних методів його реалізації.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений вибору теми дослідження і його основним напрямам. В розділі приведено характеристику методологічної структури дисертації і приведено її методологічне забезпечення.

У технологічному забезпеченні методологічного обґрунтування роботи вказана мета дисертаційного дослідження і представлена його головна задача, причому методами теорії дослідження операцій здійснена її декомпозиція на незалежні складові задачі. Сформульована і

підтверджена робоча гіпотеза наукового дослідження, показано, що при рішенні незалежних складових задач одержані відповідні наукові результати дисертаційної роботи.

У другому розділі також показані значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, а також сформульоване основне наукове положення роботи. Приведена коротка методика рішення складових задач, поставлених в роботі, причому вона описує основні етапи виконання наукового дослідження по темі дисертації та включає теоретичні розробки і проведення імітаційного комп'ютерного моделювання.

У **третьому розділі** досліджено розширений принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, який може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження, що являється першою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі приведено математичний опис елементарної групи суден, що небезпечно зближуються і показано, що основними аспектами попередження зіткнення елементарної групи суден є метод управління процесом розходження, спосіб оцінки небезпеки зближення та вибору маневру розходження і форма домену неприпустимих позицій.

Показано, що принципово важливим аспектом управління елементарної групою суден є його повнота, яка може бути реалізована наступними двома підходами.

Одним з них є локально-незалежне управління, суть якого полягає в контролі окремим судном поточного стану елементарної групи суден, в якій воно знаходиться, а при наявності ситуаційного збурення його компенсація проводиться, як правило, одним із взаємодіючих суден. Такий тип управління є досить короткозорим і може ефективно використовуватися тільки при низькій інтенсивності руху суден.

Якісно іншим є повне (зовнішнє) управління зовнішнім управлінцем, який розпоряджається стратегіями суден елементарної групи та спостерігає поточну ситуацію і, при наявності ситуаційного збурення, компенсує його спільним маневром розходження. Таким управлінцем може бути, як служба управління рухом суден (СУРС), так і, що принципово важливо, суднова інформаційна система, з тими ж можливостями, встановлена на кожному із суден, що вирішує задачу колективної компенсації ситуаційного збурення і реалізує отриману в результаті рішення індивідуальну стратегію.

Саме висока ефективність повного керування при великій інтенсивності руху суден зумовила появу і стрімкий розвиток СУРС. Очевидно, розвиток принципів зовнішнього керування процесом розходження є одним з найбільш перспективних напрямків зниження аварійності в обмежених умовах плавання.

Досліджено взаємозв'язок параметрів істинного і відносного руху суден елементарної групи та проведено його аналіз. Отримано аналітичні вирази прямого і зворотного відображень простору істинного руху в простір відносного руху. Особливістю залежності відносного курсу від істинного курсу полягає у тому, що для випадку, коли швидкість судна V_1 менша швидкості цілі V_2 , тобто $V_1 < V_2$, при монотонному зростанні курсу K_1 , в залежності від його поточного значення відносний курс K_{ot} , може як збільшуватися, так і зменшуватися.

В розділі показано, що відносний курс K_{ot} приймає значення в інтервалі $[K_{otmin}, K_{otmax}]$, де екстремальні відносні курси:

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \text{ та } K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \rho,$$

які досягаються на відповідних істинних курсах K_{1min} і K_{2min} :

$$K_{1min} = K_2 + \arccos \rho \text{ та } K_{1max} = K_2 - \arccos \rho,$$

де $\rho = V_1/V_2$.

Таким чином, при зміні курсу K_1 судна у діапазоні від 0 до 2π відносний курс K_{ot} буде приймати значення з діапазону $[K_{otmin}, K_{otmax}]$, як показано на рис. 1.

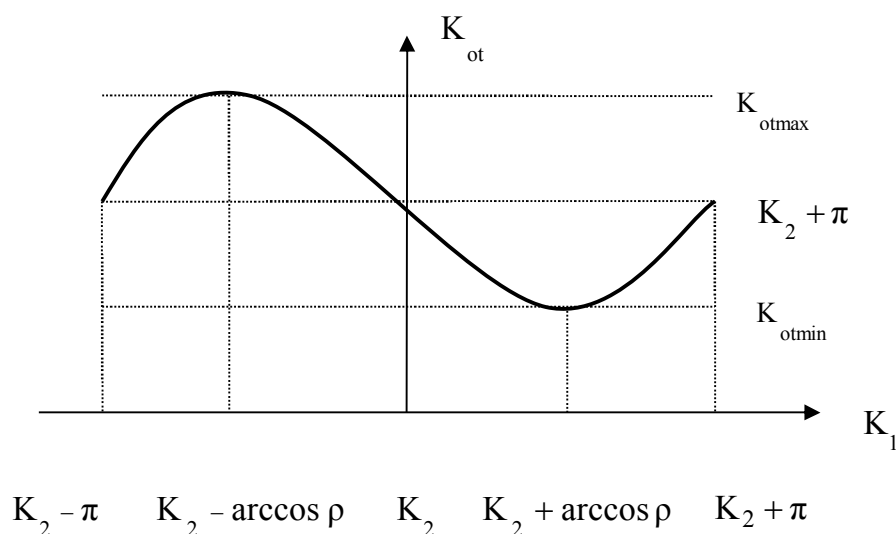


Рисунок 1 – Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_1

В третьому розділі здійснено аналітичний опис ситуації небезпечного зближення суден елементарної групи, що дозволяє виявити появу ситуаційного збурення і оцінити його інтенсивність.

Отримано модель формалізації областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи, як проекції що розділяє межі

чотиримірному простору істинного руху на двомірні площини параметрів руху різних суден групи. Дійсно, в розділі одержано рівняння:

$$V_1(\sin K_1 \cos \gamma - \cos K_1 \sin \gamma) = V_2(\sin K_2 \cos \gamma - \cos K_2 \sin \gamma), \quad (1)$$

де $\gamma = \alpha \pm \arcsin\left(\frac{D_d}{D}\right)$, α і D - відповідно пеленг на ціль і відстань між судном та ціллю, D_d - гранично-допустима дистанція зближення.

Приведене рівняння (1) пов'язує значення параметрів руху суден K_1 , V_1 , K_2 та V_2 , при яких досягається межа в просторі істинного руху між множинами небезпечних та допустимих ситуацій зближень суден, коли дистанція найкоротшого зближення D_{\min} дорівнює гранично допустимій дистанції зближення D_d , тобто справедливою є рівність $\min D = D_d$. Тому, якщо в просторі істинного руху межу (1) проектувати на площини, осями яких є параметри руху різних суден, тобто з чотирьох параметрів руху суден зафіксувати два параметра P_a та P_b , а два, що залишилися, P_x та P_y розглядати, як перемінні величини, то за допомогою рівняння (1) можна отримати залежність між параметрами P_x та P_y :

$$P_y = f(\gamma, P_a, P_b, P_x),$$

яка представляє криву на площині $P_x \times P_y$, що є межею області Ω неприпустимих значень параметрів P_x та P_y . Для точок $(\rho_x, \rho_y) \in \Omega$ зближення суден небезпечне, якщо ж точки (ρ_x, ρ_y) знаходяться на межі області Ω або поза нею, то зближення безпечне і ситуація зближення допустима.

В розділі показана можливість формування трьох типів областей: область неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна.

Слід врахувати, що в рівнянні (1) значення D_d є незмінним тільки для домену круглої форми, а для доменів іншої форми значення D_d залежить від пеленга, курсу судна-партнера K_p і параметрів форми домену θ_i , тобто $D_d(\alpha, K_p, \theta_i)$. Отже, в загальному випадку існує можливість розробки різних аналітичних систем попередження зіткнення суден $Sist$, кожна з яких характеризується наступними істотними аспектами:

- принципом управління процесом розходження суден Pr ;
- способом оцінки безпеки зближення і вибору маневру розходження $SpDv$;
- формою домену неприпустимих позицій Φ .

Таким чином, методи аналітичного розрахунку попередження зіткнення суден формально записується в такий спосіб $Sist\{Pr, SpDv, \Phi\}$. У цьому дослідженні розглянуто аналітичні методи, в яких реалізований принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, а способом оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження обраний спосіб формування двовірних областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден. Вибір принципу зовнішнього керування процесом розходження суден обумовлений його високою ефективністю в обмежених районах плавання, обладнаних СУРС. Більш того, при цьому принципі керування немає необхідності використання бінарної координації взаємодії суден. Спосіб формування двовірних областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден є оперативним і зручним для реалізації у вигляді комп'ютерного модуля.

Таким чином, у розділі досліджено розширений принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, який може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 11, 27, 38, 40, 45, 47, 48, 57, 60].

У **четвертому розділі** розглянуто питання розробки методів аналітичного розрахунку попередження зіткнення суден, які призначені для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми, що являється другою складовою задачею дисертаційного дослідження.

У розділі проведений аналітичний опис системи попередження зіткнення суден, в якому використовується домен круглої форми, в центрі якого знаходиться судно.

В розділі наведено метод формування області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, який враховує співвідношення швидкостей суден групи. Аналітичний вираз межі області неприпустимих значень курсів S_{Dij} , що обгороджує неприпустимі поєднання значень пар відповідних курсів K_1 та K_2 , для яких $\min D < D_d$, має наступний вигляд:

$$K_1 = \gamma + \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\},$$

де $\rho = V_2 / V_1$.

В разі коли $V_2 > V_1$, тобто $\rho > 1$, має дотримуватися умова $\rho[\sin(K_2 - \gamma)] \leq 1$, тому граничні значення курсу K_2 дорівнюють:

$$K_{21} = \gamma + \arcsin(\rho^{-1}); K_{22} = \gamma + \pi - \arcsin(\rho^{-1});$$

$$K_{23} = \gamma + \pi + \arcsin(\rho^{-1}); K_{24} = \gamma + 2\pi - \arcsin(\rho^{-1}),$$

а область значень змінної K_2 визначається виразом:

$$K_2 \in \{S_1 \cup S_2\},$$

де області S_1 та S_2 можливих значень курсу K_2 аналітично визначаються наступним чином:

$$S_1 = [\gamma + 2\pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \arcsin(\rho^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma + \pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \pi + \arcsin(\rho^{-1})].$$

Межі області курсів S_{Dij} для параметрів ситуації зближення $V_1 = 10$ вуз., $V_2 = 20$ вуз., $D = 3$ милі, $\alpha = 0^\circ$ та $D_d = 1$ миля показані на рис. 2. В роботі також приведені процедури формування області курсів S_{Dij} для випадків $V_2 < V_1$ та $V_2 = V_1$.

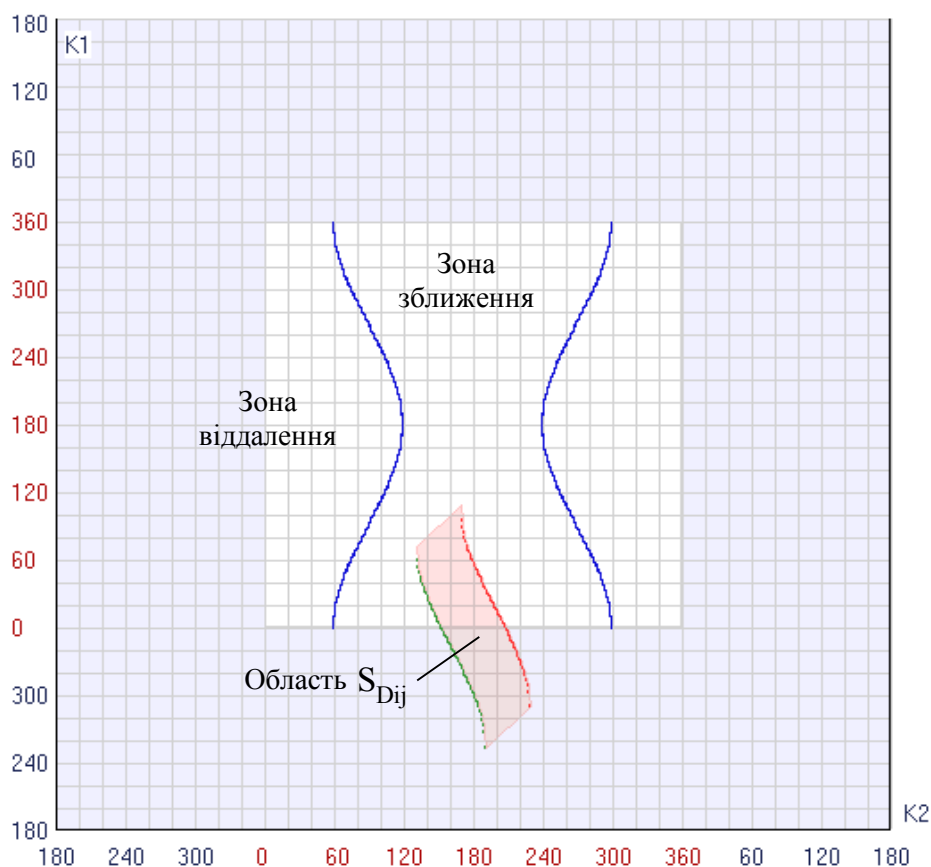


Рисунок 2 – Область S_{Dij} при $V_2 > V_1$ та $D = 3$

Таким чином, маючи в своєму розпорядженні область неприпустимих значень курсів S_{Dij} двох суден можна вибрати їх безпечні курси ухилення, що забезпечують розходження на відстані, яка більше величини граничнодопустимої дистанції.

Задача визначення параметрів оптимального маневру розходження в першу чергу вимагає, щоб точки, відповідні парним курсам, (K_1, K_2) знаходилися поза областю неприпустимих значень курсів S_{Dij} , що є умовою належності точки (K_1, K_2) до області допустимих значень:

$$(K_1, K_2) \notin S_{Dij}.$$

В розділі отримано спосіб розрахунку меж області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, які являються прямими лініями і визначаються відповідно для верхньої та нижньої межі:

$$V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)}, \quad V_{1*} = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)},$$

де $\gamma^* = \alpha - \arcsin D_d/D$; $\gamma_* = \alpha + \arcsin D_d/D$.

В роботі одержано умови існування області небезпечних швидкостей, яка має вигляд показаний на рис. 3. В даному прикладі параметри ситуації зближення мають такі значення: $\alpha_0 = 45^\circ$, $D_0 = 3$ милі, $D_d = 1$ миля, $K_1 = 90^\circ$, $K_2 = 180^\circ$. При початкових швидкостях $V_1 = 18$ вуз. та $V_2 = 21$ вуз. дистанція найкоротшого зближення $D_{\min} = 0,23$ милі. .

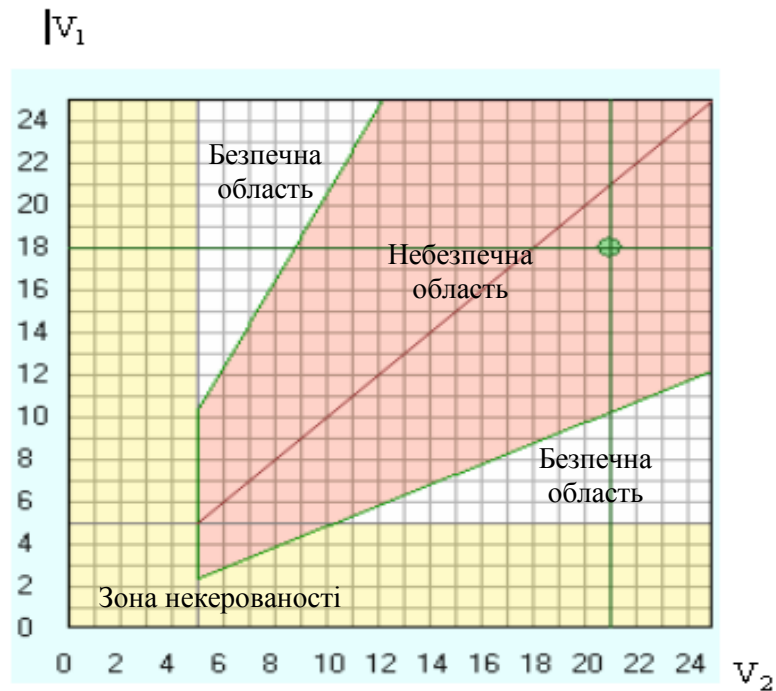


Рисунок 3 – Область небезпечних швидкостей суден

У роботі розроблено процедури урахування інерційних характеристик суден при виборі безпечного маневру розходження зміною їх швидкостей, які реалізовані в комп'ютерній програмі, що забезпечує визначення оптимального моменту часу початку гальмування суден.

У четвертому розділі запропоновано спосіб формування і застосування області Ω_{KV} неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна, в роботі показано, що існує дві межі, на яких досягається рівність $\min D = D_d$:

$$V_2^{(1)} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha + \arcsin \frac{D_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha - \arcsin \frac{D_d}{D})],$$

$$V_2^{(2)} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha - \arcsin \frac{D_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha + \arcsin \frac{D_d}{D})].$$

Якщо початкова швидкість другого судна перевершує швидкість першого, яке маневрує зміною курсу, тобто $V_1 < V_{2n}$, то межі області Ω_{KV} існують для обмежених значень K_1 і V_2 :

$$K_1 \in [\gamma^{(1,2)} - \frac{\pi}{2}, \gamma^{(1,2)} + \frac{\pi}{2}] \text{ та } V_2 \in [0, \frac{V_1}{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}].$$

Для формування області Ω_{KV} та її графічного відображення була розроблена комп'ютерна програма, що враховує співвідношення початкових швидкостей суден V_1 та V_{2n} .

В разі $V_1 > V_{2n}$ існують значення $K_1 (V_2^{(1,2)} = V_{2n})$ для обох меж, а область Ω_{KV} небезпечних параметрів курсу одного судна і швидкості другого судна, укладена між першою і другою межами виглядає, як показано на рис. 4, причому область Ω_{KV} сформована для ситуації небезпечного зближення суден з параметрами: $\alpha=130^\circ$, $D=3$ милі, $K_1=130^\circ$, $V_1=22$ вузли, $K_2=315^\circ$, $V_2=18$ вузлів, $d_d=1$ миля.

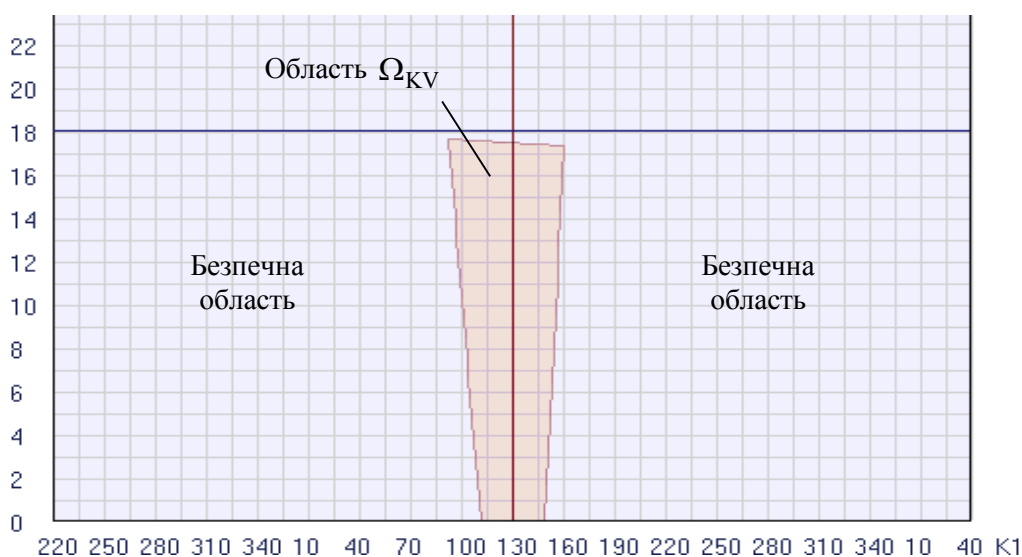


Рис. 4. Область Ω_{KV} небезпечних параметрів руху суден при $V_1 > V_{2n}$

Врахування інерційності повороту першого судна і інерційно-гальмівних характеристик другого судна при формуванні меж області Ω_{KV} передбачає визначення для кожного курсу K_{1y} першого судна швидкості гальмування другого судна V_{2y} , при якій судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення D_{\min} , що дорівнює гранично допустимій дистанції D_d .

Таким чином, у розділі розглянуто питання розробки аналітичної системи попередження зіткнення суден, яка призначена для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [6, 12, 14, 17, 19, 24, 29, 32, 34, 37, 39, 44, 51, 54, 56, 58, 59, 61].

У **п'ятому розділі** розглянуто формування загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що являється третьою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі розглянуто спосіб формування області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи з урахуванням їх інерційності при зміні курсів. Показано, що без урахування інерційності судна при повороті прогнозована дистанція найкоротшого зближення менше гранично допустимої дистанції D_d на величину ΔD_d , яка залежить від типу динамічних моделей обертального руху судна. Так в роботі приведено приклад, що для моделі повороту судна з постійною кутовою швидкістю значення $\Delta D_d^{(1)} = 0,154$ милі, в разі використання першої моделі обертального руху судна, що враховує його інерційність при повороті в першому наближенні, отримано $\Delta D_d^{(2)} = 0,201$ милі, а при застосуванні другої моделі обертального руху судна, що враховує його інерційність при повороті в другому наближенні, $\Delta D_d^{(3)} = 0,206$ милі. При розрахунках приймалось значення $D_d = 1$ миля. Тому при розрахунку меж області небезпечних курсів S_{Dij} належить граничнодопустиму дистанцію зближення збільшити на $\Delta D_d^{(3)}$, тобто в наведеному прикладі при розрахунку меж області небезпечних курсів слід вибрати D_d рівній 1,206 милі замість 1 милі, що забезпечить найкоротше зближення на відстані 1 миля при використанні області S_{Dij} .

В роботі показано, що для формування області небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням інерційності суден при повороті в рівняннях меж

необхідно граничнодопустиму дистанцію D_d збільшити на величину прирощення дистанції ΔD_d , тобто рівняння меж набирає вигляду:

$$K_1 = \alpha \mp \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D} + \arcsin \{ \rho \sin(K_2 - \alpha \mp \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D}) \}.$$

За допомогою розробленої комп'ютерної програми була згенерована ситуація небезпечного зближення суден для випадку $V_1 > V_2$, параметрами якої є: відносна позиція зближення $\alpha_{12} = 158^\circ$, $D_{12} = 2,0$ милі та параметри руху обох суден $K_1 = 117^\circ$, $V_1 = 23$ вузли, $K_2 = 58^\circ$, $V_2 = 14$ вузлів, величина граничнодопустимої дистанції зближення суден D_d обрана рівною 1 милі.

Межі області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і без нього представлені на рис. 5. У даній ситуації межі області небезпечних курсів при врахуванні інерційності суден, які показані синім кольором, значно відрізняються від меж без урахування їх інерційності.

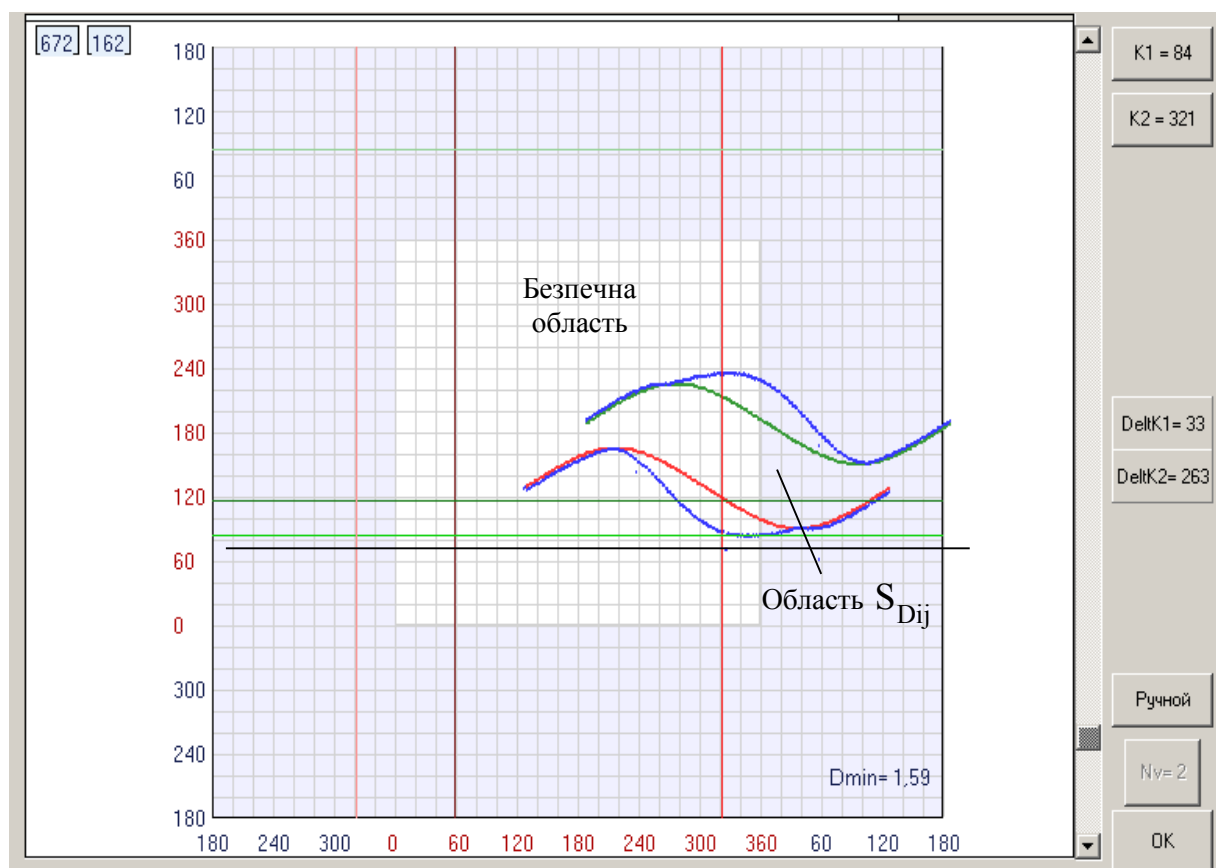


Рисунок 5 – Межі області S_{Dij} з урахуванням інерційності суден при $V_1 > V_2$

В розділі також запропоновано процедуру урахування інерційно-гальмівних характеристик суден елементарної групи при формуванні

областей неприпустимих значень параметрів їх руху при зміні швидкостей. Якби маневр суден зменшенням їх швидкостей характеризувався короткочасними перехідними процесами, то визначення швидкостей V_{1y} та V_{2y} можна було б проводити за допомогою області небезпечних значень швидкостей Ω_V , як було показано в попередньому розділі. Однак зниження швидкості суден гальмуванням вимагає значного часу, тому при виборі маневру зниженням швидкостей суден слід враховувати їх інерційно-гальмівні характеристики.

В роботі показано, що для вибору безпечного маневру при його зовнішньому управлінні гальмуванням обох суден слід в початковий момент часу $t_n = 0$ почати гальмування обох суден (активне або пасивне) до швидкостей V_{1y} та V_{2y} , які необхідно визначити і вони повинні мінімально відрізнятись від початкових значень відповідних швидкостей V_1, V_2 .

Причому для швидкостей V_{1y} та V_{2y} повинна досягатися рівність дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y})$ з граничнодопустимою дистанцією зближення D_d , тобто $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$, до моменту часу закінчення перехідного процесу, що збігається з моментом часу найкоротшого зближення.

Для формування області Ω_{KVf} небезпечних курсів одного судна і швидкостей другого судна з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик другого судна була розроблена комп'ютерна програма, яка реалізує запропонований в роботі алгоритм розрахунку межі області.

В якості прикладу було розглянуто ситуацію небезпечного зближення суден з параметрами: $\alpha = 130^\circ$, $D = 3$ милі, $K_1 = 130^\circ$, $V_1 = 22$ вузли, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 18$ вузлів, $D_d = 1$ миля. Для наведеної ситуації небезпечного зближення суден на рис. 6 показана область Ω_{KVf} при зниженні швидкості другого судна пасивним гальмуванням. Поєднання параметрів суден K_{1y} та V_{2y} на межі області забезпечує дистанцію найкоротшого зближення $D_{\min f} = 1$ миля. На рис. 6 обрана стратегія суден з параметрами $K_{1y} = 163^\circ$ та $V_{2y} = 15,6$ вузла (точка межі показана концентричними колами), які забезпечують найкоротшу дистанцію $D_{\min f} = 1,01$ милі.

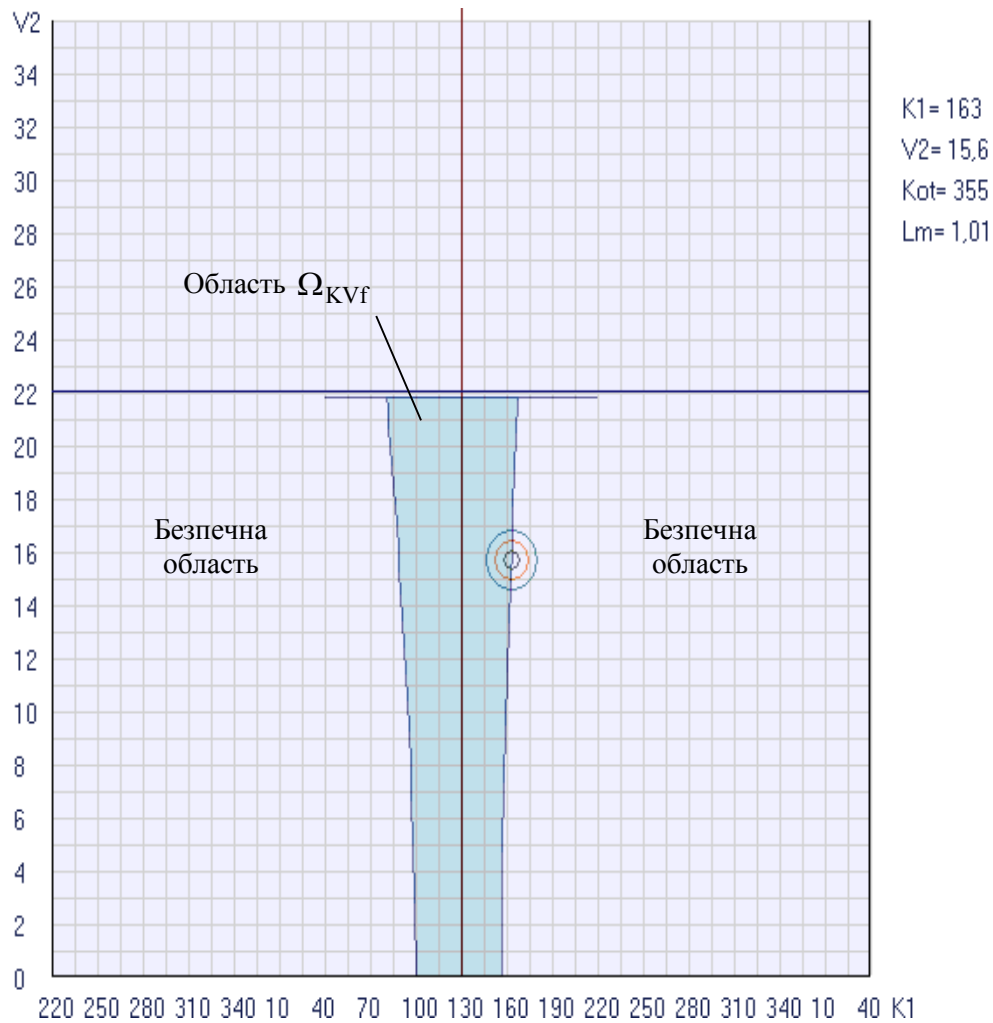


Рисунок 6 – Область Ω_{KVf} при пасивному гальмуванні другого судна

В розділі розроблено процедуру врахування навігаційних перешкод при виборі маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден. Для безпечного проходження судном точкової перешкоди необхідно, щоб значення дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ судна з перешкодою було б не меншим за значення граничнодопустимої дистанції найкоротшого зближення \hat{l}_n , що визначає граничні курси ухилення судна K_{y*} та K_y^* :

$$K_{y*} = \alpha_n - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}; \quad K_y^* = \alpha_n + \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}.$$

Тому безпечними курсами ухилення K_y при розходженні є ті, які не належать до підмножини $[K_{y*}, K_y^*]$, тобто $K_y \notin [K_{y*}, K_y^*]$. На рис. 7

показана область небезпечних курсів суден S_{Dij} , специфічна форма якої викликана рівністю швидкостей суден, що зближуються. На розширену площину курсів суден пунктирними лініями нанесені граничні безпечні курси ухилення обох суден. При виборі курсів ухилення суден забороняється використовувати курси, які знаходяться між відповідними граничними значеннями.



Рисунок 7 – Область небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням точкової небезпеки

В роботі також розглянуто процедури урахування розподіленої лінійної навігаційної перешкоди та складної розподіленої навігаційної небезпеки.

Таким чином, у розділі розглянуто формування загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [3, 4, 7, 8-10, 13, 20, 23, 25, 31, 41, 46, 55, 62].

У шостому розділі розглянуто спосіб урахування третього судна, яке заважає, при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього

управління процесом розходження та метод перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, який заснований на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що являється четвертою та п'ятою складовими задачами дисертаційного дослідження.

У розділі розглянуто ситуації небезпечного зближення групи суден, числом більше двох, і способи вибору безпечного маневру розходження в таких ситуаціях. Перш за все, в розділі запропоновано процедуру урахування третього судна, яке заважає, при виборі безпечного спільного маневру розходження зміною курсу і швидкості пари суден, причому розглянуто як активне, так і пасивне гальмування судна, що знижує швидкість.

Припустимо в районі маневрування наявність третього судна, яке не задіяне в процесі розходження, однак обмежує маневр розходження суден, оскільки може створити загрозу небезпечного зближення з одним з них або з обома суднами. При наявності третього судна, яке заважає, параметри маневру розходження K_{1y} та V_{2y} для безпечного розходження повинні задовольняти умові переваги дистанцій найкоротшого зближення між суднами над гранично допустимою дистанцією зближення, що аналітично виражає в такий спосіб:

$$\begin{cases} \min D_{12}(K_{1y}, V_{2y}) \geq D_d, \\ \min D_{13}(K_{1y}) \geq D_d, \\ \min D_{23}(V_{2y}) \geq D_d. \end{cases}$$

Для першого і другого суден, що маневрують, слід сформуванати область Ω_{KVj} неприпустимих курсів першого судна і швидкостей другого судна з урахуванням режиму гальмування, чим враховується перша нерівність приведеної системи. Після вибору безпечного маневру розходження, як точки (K_{1y}, V_{2y}) межі області Ω_{KVj} необхідно розрахувати значення дистанцій найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})$ та $\min D_{23}(V_{2y})$ відповідно першого і третього, а також другого і третього суден.

Для оцінки безпечності маневру розходження суден при наявності третього судна, яке заважає, була розроблена комп'ютерна програма, яка при виборі маневру розходження, відповідного певній точці межі області Ω_{KVj} , розраховує також дистанції $\min D_{13}(K_{1y})$ та $\min D_{23}(V_{2y})$, виводить їх значення на екран монітору і порівнює з граничнодопустимою дистанцією зближення.

В якості прикладу на рис. 8 на межі області Ω_{KVj} вибрано маневр з параметрами $K_{1y}=296^\circ$ та $V_{2y}=7,15$ вузла. Як випливає з рисунку, перше і друге судна розходяться на дистанції 1,08 милі, дистанції $\min D_{13}(K_{1y})=2,04$ милі та $\min D_{23}(V_{2y})=1,03$ милі перевищують граничнодопустиму дистанцію зближення. Обраний маневр безпечний для всіх трьох суден, що підтверджує зелений колір інформаційних панелей дистанцій найкоротшого зближення.

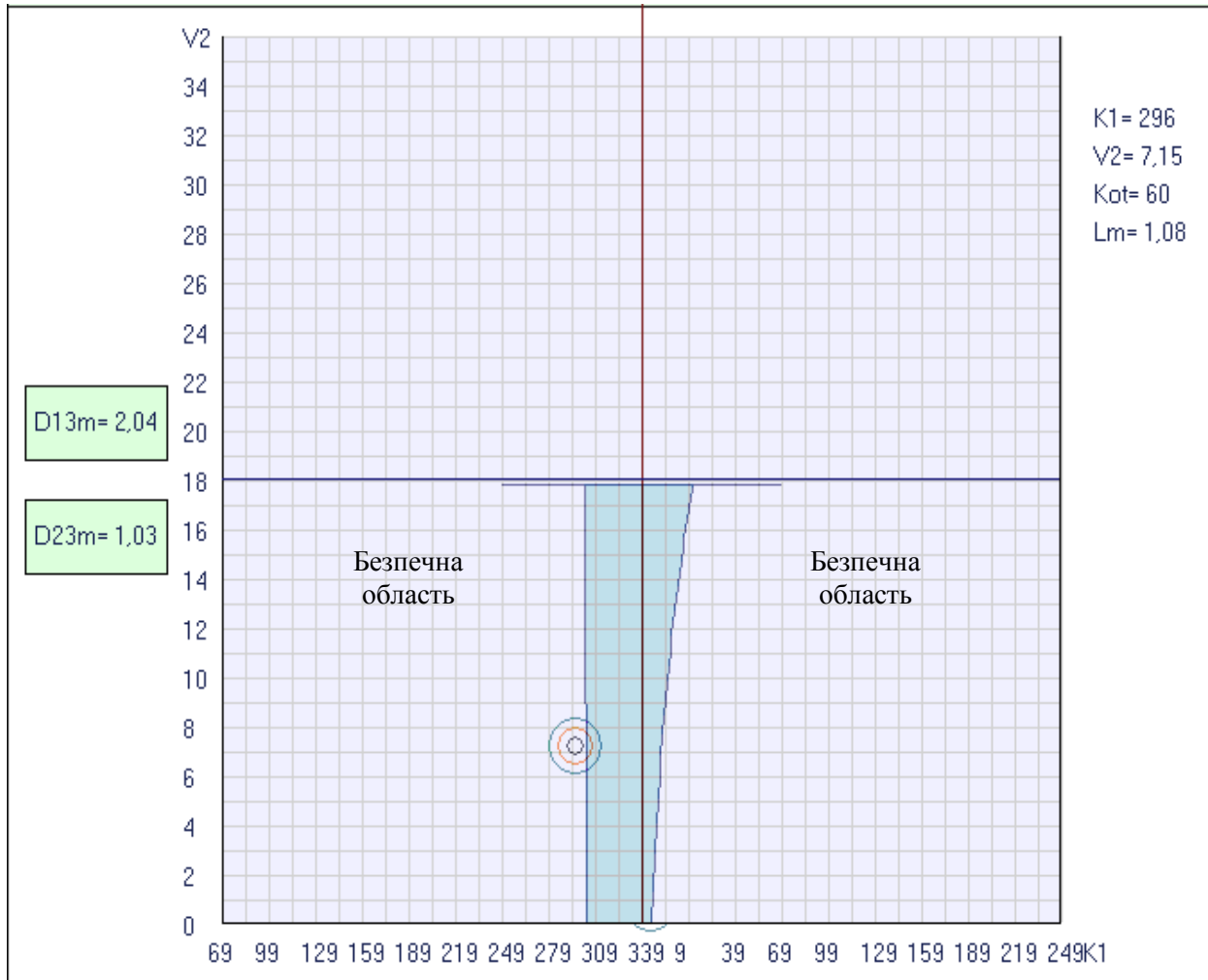


Рисунок 8 – Маневр розходження безпечний для всіх суден

У шостому розділі знайдено відповідні граничні курси K_{1y}^* та K_{1y}^* , які визначають можливості безпечного розходження першого і третього суден:

$$K_{1y}^* = K_{oty13}^* + \arcsin [p^{-1} \sin(K_3 - K_{oty13}^*)],$$

$$K_{1y}^* = K_{oty13}^* + \arcsin [p^{-1} \sin(K_3 - K_{oty13}^*)],$$

де $p = V_1 / V_3$; $K_{oty13*} = \alpha_{13k} - \arcsin \frac{D_d}{D_{13k}}$ та $K_{oty13}^* = \alpha_{13k} + \arcsin \frac{D_d}{D_{13k}}$.

Також отримані вирази для граничних швидкостей другого судна при зближенні другого і третього суден:

$$V_{2y}^* = V_3 \frac{\sin(K_{oty23}^* - K_3)}{\sin(K_{oty23}^* - K_2)}; \quad V_{2y^*} = V_3 \frac{\sin(K_{oty23} - K_3)}{\sin(K_{oty23} - K_2)}.$$

Таким чином, курс ухилення першого судна вибирається за умовою $K_{1y} \notin [K_{1y}^*, K_{1y}]$, а швидкість другого судна - $V_{2y} \notin [V_{2y}^*, V_{2y}]$.

В розділі розроблено спосіб вибору маневру розходження трьох суден за допомогою спільного застосування області неприпустимих значень курсів суден групи, тобто із областей неприпустимих значень курсів S_{D12} , S_{D13} та S_{D23} , слід вибрати такі значення K_1 , K_2 та K_3 , парні поєднання яких не належали б відповідним небезпечним областям, що аналітично виражається в такий спосіб:

$$(K_1, K_2) \notin S_{D12}; \quad (K_1, K_3) \notin S_{D13}; \quad (K_2, K_3) \notin S_{D23}.$$

Отримані значення курсів суден забезпечать їх розходження на відстанях, перевищують граничнодопустиму дистанцію зближення. У разі небезпечного зближення трьох суден слід визначити небезпечні області кожної пари суден S_{D12} , S_{D13} та S_{D23} (рис. 9) і безпечні курси розходження визначаються точкою простору $OK_1K_2K_3$, проекції якої не належать жодній небезпечній області, наприклад точка М.

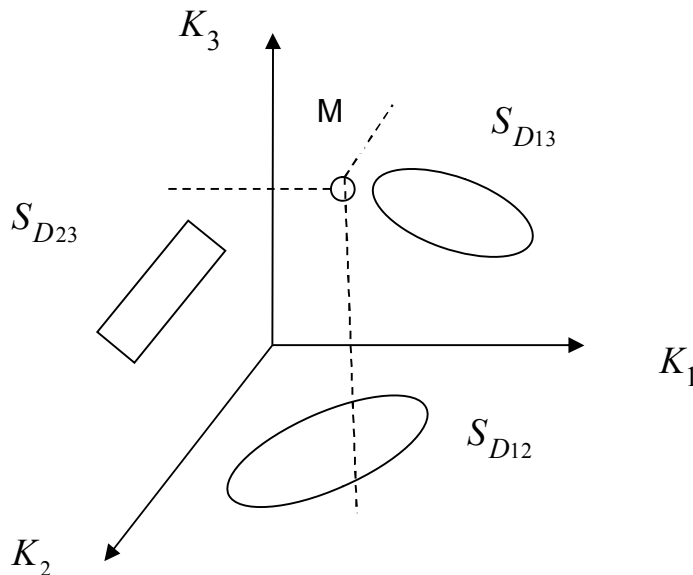


Рисунок 9 – Геометрична інтерпретація безпечних курсів розходження

Вибір курсів ухилення для безпечного розходження зручно проводити графічним способом при наявності графічного відображення небезпечних областей S_{Dij} , як показано на рис. 10. Аналіз положення небезпечних областей показує, що зручніше за все змінити курси першого і третього суден, причому їх відхилення від початкових курсів буде мінімальним.

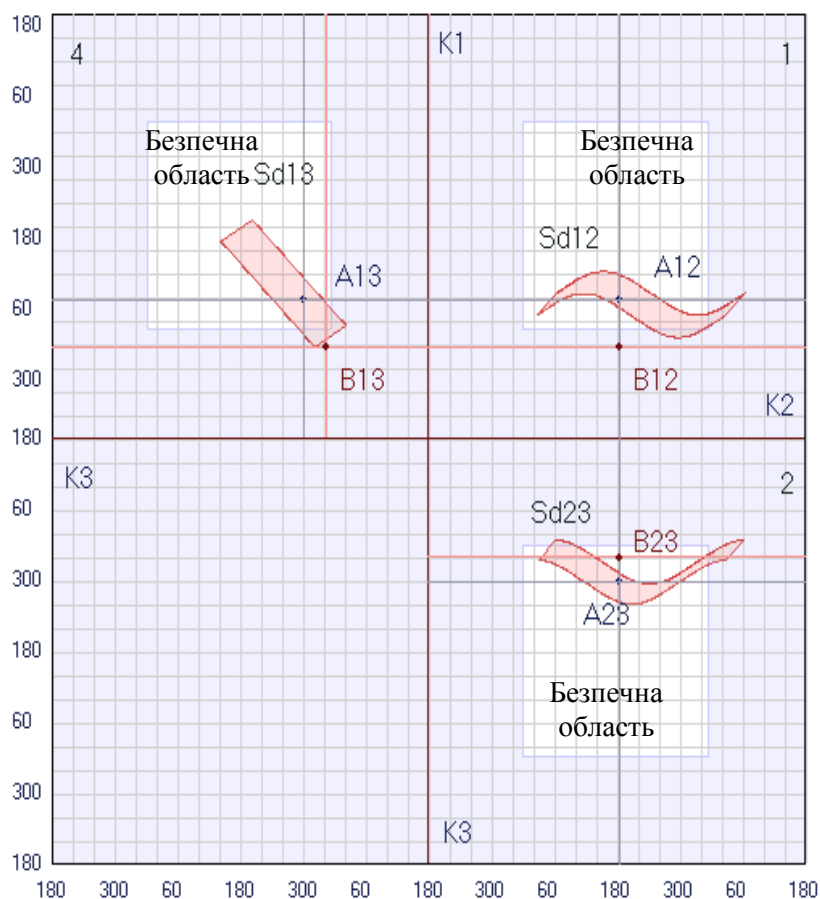


Рисунок 10 – Небезпечні області S_{D12} , S_{D13} та S_{D23}

В розділі досліджено питання визначення оптимального вектора зовнішнього керування групою суден, кількістю до п'яти включно, що небезпечно зближаються, шляхом мінімальної зміни їх курсів прямування, причому показано можливості комп'ютерної реалізації методу. Для визначення безпечного розходження групи суден розроблена процедура вибору оптимального вектора керування за допомогою комп'ютерного сканування небезпечних областей парних маневрів, а також запропонована реалізація графічного способу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.

Таким чином, у розділі розглянуто спосіб урахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження та метод перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [5, 15, 16, 18, 26, 28, 30, 42, 49, 50, 52].

Сьомий розділ присвячений розробці аналітичного опису систем попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної, прямокутної та складної форм безпечного домену судна та формуванню групи методів аналітичної системи попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху, що являється шостою та сьомою складовими задачами дисертаційного дослідження.

У розділі показано, що для таких аналітичних систем попередження зіткнення суден гранично допустима дистанція зближення D_d не є постійною, а залежить від параметрів ситуації зближення. Отримано аналітичні вирази для залежностей D_d від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену, які були використанні в комп'ютерній програмі.

За допомогою зміни пеленга від 5° до 360° програмою розраховувалися відповідні значення граничного відносного курсу ухилення $K_{от}^s$ і дистанції $D_d(K_c)$, що представлені на рис. 11 для домену еліптичної форми, в правій частині якого наведена графічна залежність гранично допустимої дистанції зближення від значення кута ракурсу.

Розробленою комп'ютерною програмою також було проведено розрахунок значень гранично допустимої дистанції зближення $D_d(K_c)$ для домену прямокутної форми, характер зміни якої показаний на рис. 12.

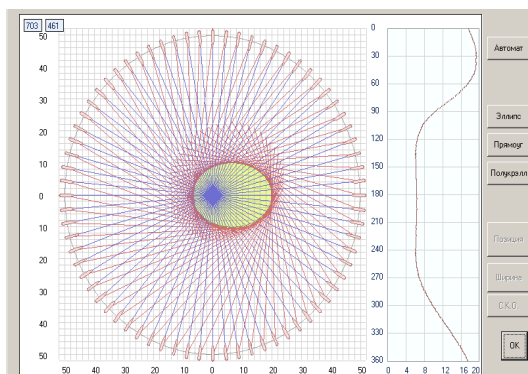


Рисунок 11 – Зміна дистанції $D_d(K_c)$ для домену еліптичної форми

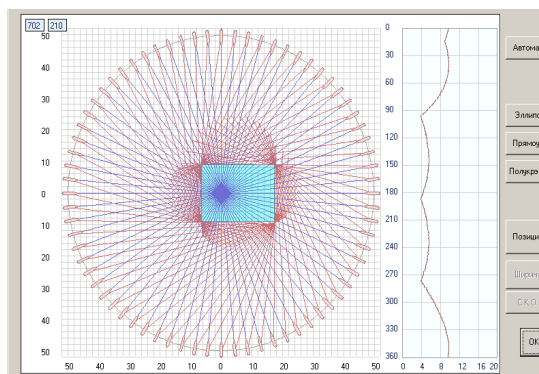


Рисунок 12 – Зміна дистанції $D_d(K_c)$ домену прямокутної форми

Розроблено процедуру формування області неприпустимих значень курсів суден в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення суден. В якості прикладу на рис. 13 показана область S_{Dij} побудована для еліптичного домену, велика вісь якого дорівнює 1 милі, а мала – $2/3$ милі. Для вибору маневру розходження на верхній межі області S_{Dij} (рис. 13), що відповідає відносному ухиленню вправо, обрана точка з курсами $K_1 = 146^\circ$ та $K_2 = 218^\circ$. На рис. 14 показано, що цьому маневру відповідає лінія відносного курсу, яка є дотичною до еліптичного домену, чим і підтверджується коректність запропонованого способу.

В розділі в якості прикладу розглянуто використання домену прямокутної форми довжиною 1,1 милі і шириною 0,61 милі для розрахунку меж області S_{Dij} за допомогою комп'ютерної програми. Вибір безпечного маневру розходження мінімальним відносним ухиленням вправо показаний на рис. 15. На рис. 16 підтверджена коректність маневру відносним ухиленням вправо.

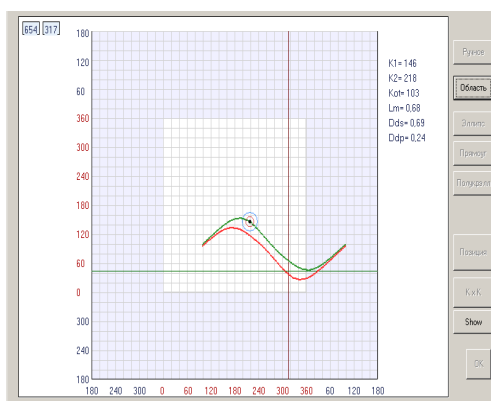


Рисунок 13 – Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

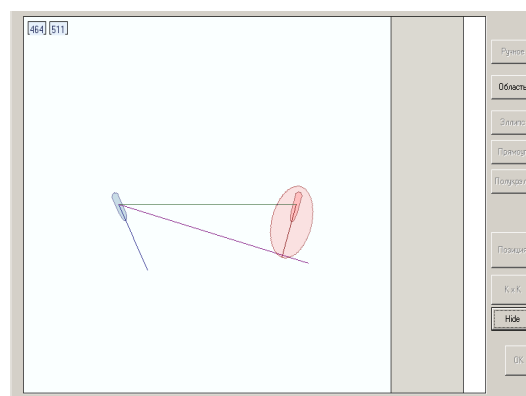


Рисунок 14 – Аналіз маневру розходження відносним ухиленням вправо

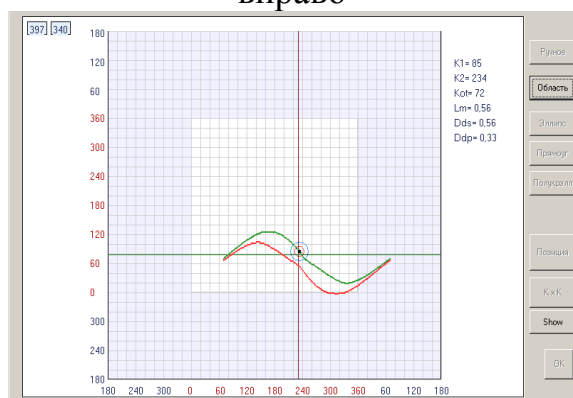


Рисунок 15 – Вибір маневру розходження мінімальним ухиленням вправо

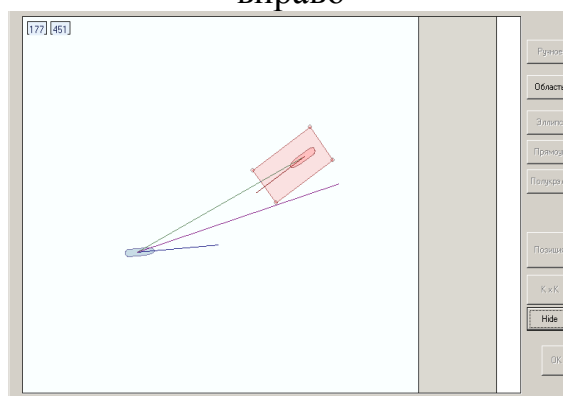


Рисунок 16 – Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

Здійснено перевірку коректності результатів дисертаційної роботи імітаційним моделюванням. Проведено аналіз коректності методів формування області неприпустимих значень курсів суден за допомогою імітаційного моделювання, який показав позитивний результат перевірки.

Виконана перевірка імітаційним моделюванням коректності методів формування області неприпустимих значень швидкостей суден, та проведено імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна. Імітаційним моделюванням процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів суден нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден показано коректність розроблених методів системи.

Таким чином, у розділі розглянуто аналітичні системи попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна та формування групи методів аналітичної системи попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [2, 21, 22, 33, 35, 36, 44, 53].

ВИСНОВКИ

Забезпечення безаварійного судноводіння сприяє зменшенню кількості аварійних випадків, що веде до збереження людського життя на морі та зниження шкоди навколишньому середовищу.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом створення аналітичних систем попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримки рішень, та які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що ураховують форму безпечного домену судна.

У виконаному дисертаційному дослідженні одержані наступні основні наукові результати:

Вперше:

- започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;

- запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які поділяються на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість

визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;

- для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних перешкод при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання;

Одержали подальший розвиток методи врахування третього судна, що заважає, при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 05.03.2020 р.), Херсонською державною морською академією (акт про впровадження від 27.05.2020 р.) для підготовки курсантів та студентів, приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 17.06.2020 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 01.09.2020 р.) та Філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 14.09.2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт про впровадження від 03.06.2020 р.), в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.) та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР

0117U005133, 2020 р.), у яких автор дисертації брав участь як виконавець у першій та як керівник у другій ДР.

Під час виконання дисертаційної роботи наступні патенти були отримані:

- патент на корисну модель № 134690 «Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10;

- патент на корисну модель № 134691 «Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

2. Бурмака И.А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография / И.А. Бурмака – Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 284 с.

3. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 9 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 7 – 13; **база(и) Google Академія.**

4. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 10 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 21 – 25; **база(и) Google Академія.**

5. Бурмака И.А. Поликритериальное управление процессом судовождения / Бурмака И.А., Дудник С.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. – Вип. 12. – Одеса: «ВидавІнформ», 2006. – С. 26 – 30; **база(и) Google Академія.**

6. Бурмака И.А. Принцип внешнего управления процессом судовождения в стесненных условиях / Бурмака И.А. // Судовождение: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 13. – Одеса: «ВидавІнформ», – 2007. – С. 28 – 32; **база(и) Google Академія.**

7. Стебновский О.В. Особенности управления судами в стесненных водах / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 16. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 157 – 161; **база(и) Google Академія.**

8. Стебновский О.В. Экспериментальные данные по поворотливости судна / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць /

ОНМА, Вип. 17. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 205 – 208; **база(и) Google Академія**.

9. Стебновский О.В. Расчет координат начала поворота судна из одного участка программной траектории на другой / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 18. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010. – С. 171 – 178; **база(и) Google Академія**.

10. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 19. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010 – С. 24 – 27; **база(и) Google Академія**.

11. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при решении задач в ситуационно - технической системе предупреждения столкновений судов // Бурмака И.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2013. - №1. – С. 45-54; **база(и) Google Академія**.

12. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 89 – 93 **база(и) Google Академія**.

13. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 48 – 54; **база(и) Google Академія**.

14. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 – 20; **база(и) РИНЦ**.

15. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 – 13; **база(и) Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref**.

16. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 18 – 23; **база(и) Index Copernicus**.

17. Бурмака И.А. Зависимость точности обсервации от существенных факторов / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Водный транспорт: Сб. научн. трудов, Вып. 2(20). – К.: КДАВТ, 2014 – С. 18 – 23; **база(и) Index Copernicus**.

18. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала

С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 3 (37). – С. 64 – 71; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref.*

19. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24 – 29; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref.*

20. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 6/9 (84). – P. 20 – 31; **база(и)** *Scopus*

21. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С., Кулаков М.А. // Эксплуатация морского транспорта. Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 2 (83). – С. 76 – 81; **база(и)** *РИНЦ.*

22. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е.// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 4 - 14; **база(и)** *Google Академія.*

23. Бурмака И.А. Использование регрессионного анализа для обработки данных поворотливости судна / Бурмака И.А., Худенко Н.П. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць ОНМУ, - 2014. - Вып. 1(40). – С. 83 – 88; **база(и)** *Google Scholar, Index Copernicus; CrossRef; Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського.*

ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ І ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

24. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И.А. Бурмака, А.И. Бурмака, Р.Ю. Бужбецкий – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

25. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 312 с.

26. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.

27. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения / Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака

А.И. // Проблемы техники: научно-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 108 - 118; **база(и)** *Google Академия*.

28. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – № 21 – С. 29 – 33; **база(и)** *Index Copernicus*.

29. Бурмака И.А. Определение эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2016 – С. 28 – 34; **база(и)** *Google Академия*.

30. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2015 – С. 35 – 40; **база(и)** *Google Академия*.

31. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности при использовании областей опасных курсов / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21; **база(и)** *Index Copernicus*.

32. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 27. – Одесса: «ВидавІнформ», 2017. – С. 32 – 37; **база(и)** *Google Академия*.

33. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V (14), Issue: 132, 2017. - С. 56 - 60; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*.

34. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С. // *East European Scientific Journal*, №11 (27), 2017, part 1. – С. 40 – 48; **база(и)** *Index Copernicus; Academic Resource Index; International Scientific Indexing; Cosmos Impact Factor*.

35. Бурмака И. А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей / Бурмака И. А. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24 – 27.

36. Бурмака И.А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения / Бурмака

И.А., Пасечнюк С.С. // Судовождение: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». - Вип. 28. – Одеса: «ВидавІнформ», 2018. – С. 16 – 24; **база(и)** *Google Академія*.

37. Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2017. – № 23. – С. 9 – 14; **база(и)** *Index Copernicus*.

38. Бурмака И.А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V (16), Issue: 148, 2017. - С. 66 – 71; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*

39. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *Austria - science*, Issue: 11, 2018. – С. 34 – 39; **база(и)** *Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

40. 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; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*

41. Бурмака И.А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / Бурмака И.А. // *Austria - science*, Issue: 16, 2018. – С. 34 – 38; **база(и)** *Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

42. Бурмака И.А. Применение области недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения при наличии мешающего судна / Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (22), Issue: 186, 2018. - С. 53 – 58 **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*

43. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *East European Scientific Journal*, № 5 (33), 2018, part 1. – С. 19 – 25; **база(и)** *Index Copernicus; Academic Resource Index; International Scientific Indexing; Cosmos Impact Factor*.

44. 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)*.

45. Singh B., Burmaka I. Use of an electronic chart for choosing an effective maneuver for a vessel to pass at a safe distance among several targets // *Sailor Today*, Oct. 2018. – P. 41 – 42.

46. Бурмака И.А. Выбор оптимальной стратегии расхождения группы судов / Бурмака И.А. // *Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 83 – 85.

47. Бурмака И.А. Характеристики безопасности системы взаимодействующих судов / Бурмака И.А. // *Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г.* - Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 133 – 136.

48. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // *Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 108 – 111.

49. Бурмака И.А. Маневрирование судна при плавании в стесненных условиях / Бурмака И.А., Сааков В.А., Калиниченко Г.Е. // *Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 111 – 113.

50. Бурмака И.А. Влияние числа линий положения на точность обсервации / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014* – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 107 – 110.

51. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною учас-ттю, 20-22 травня 2015 р.* – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 22 – 24.

52. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інфор-маційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96 – 98.

53. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 114 – 115.

54. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях / Бурмака И.А., Кулаков М.А. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 115 – 117.

55. Бурмака И.А. Требования, обеспечивающие наличие множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. – С. 120 – 122.

56. Бурмака И.А. Типы управления парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 109 – 112.

57. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91 – 92.

58. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв: МУК, 2017. – С. 21 – 23.

59. Бурмака И.А. Внешнее управление процессом расхождения судов с помощью области их опасных курсов и скоростей / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавання, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 139 – 142.

60. Бурмака И.А. Уравнение границы области недопустимых значений параметров движения сближающихся судов / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 93 – 95.

61. Бурмака И.А. Формирование области недопустимых значений скоростей судов с учетом их инерционно-тормозных характеристик / Бурмака И.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 190 – 193.

62. I. Burmaka Safe passing with momentum consideration / Igor Burmaka, Dmytro Zhukov, Mykhaylo Miyusov, Marina Chesnokova // The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20), 30 October – 1 November 2019, Tokyo, Japan. P. 73 – 74.

АНОТАЦІЯ

Бурмака І.О. Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 - Річковий та морський транспорт). - Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2020.

В роботі сформульовано принципи формування попередження зіткнення суден елементарної групи, в основі яких лежить принцип управління процесом розходження суден, способи оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження і форма домену неприпустимих позицій.

Показана можливість формування трьох типів областей: область неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна.

Проведено аналітичний опис системи попередження зіткнення суден, в якій використовується домен круглої форми. Отримано аналітичні вирази меж трьох типів областей неприпустимих параметрів та розроблено комп'ютерні процедури формування та графічного

відображення всіх типів областей, показано їх використання для вибору безпечної стратегії розходження зміною параметрів руху обох суден.

Досліджені питання урахування динаміки суден і навігаційних небезпек при формуванні областей неприпустимих значень параметрів руху і розрахунку їх меж із застосуванням різних динамічних моделей обертального руху судна та з урахуванням їх інерційно-гальмівних характеристик. Отримано метод урахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що передбачає зміну курсу одного або обох суден.

В роботі розглянуто ситуації небезпечного зближення групи суден, числом більше двох, і способи вибору безпечного маневру розходження в таких ситуаціях. Досліджено питання визначення оптимального вектора зовнішнього керування групою суден, що небезпечно зближаються шляхом мінімальної зміни їх курсів прямування.

В роботі досліджено попередження зіткнення суден, домени яких мають еліптичну, прямокутну і складну форми, та отримано аналітичні вирази для залежностей гранично - допустимої дистанції зближення від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену. Розроблено процедуру формування області неприпустимих значень параметрів руху суден і попередження зіткнення суден. У завершення роботи представлені результати перевірки коректності одержаних результатів дисертаційної роботи, для чого була розроблена імітаційна комп'ютерна програма, яка складається з двох основних модулів, що забезпечують вибір маневру розходження одним із розроблених методів для заданої ситуації небезпечного зближення і програвання вибраного маневру розходження, внаслідок чого робиться висновок про його коректність.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, зовнішнє управління, аналітичні методи попередження зіткнення суден, маневри розходження суден спільною зміною їх параметрів руху, області неприпустимих параметрів.

АННОТАЦІЯ

Бурмака И.А. Развитие теории и методов внешнего управления судами в ситуации опасного сближения. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук за специальностью 05.22.13 – навигация и управление движением (271 - речной и морской транспорт). - Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, 2020.

В работе сформулированы принципы формирования предупреждения столкновения судов элементарной группы, в основе которых лежит принцип управления процессом расхождения судов, способы оценки опасности сближения и выбора маневра расхождения, а также форма домена недопустимых позиций.

Показана возможность формирования трех типов областей: область недопустимых значений курсов элементарной группы судов, область недопустимых значений скоростей элементарной группы судов, область недопустимых значений курсов одного судна и скоростей другого судна.

Проведено аналитическое описание системы предупреждения столкновений судов, в которой используется домен круглой формы. Получены аналитические выражения границ трех типов областей недопустимых параметров и разработаны компьютерные процедуры формирования и графического отображения всех типов областей, показано их использование для выбора безопасной стратегии расхождения изменением параметров движения обоих судов.

Исследованы вопросы учета динамики судов и навигационных опасностей при формировании областей недопустимых значений параметров движения и расчета их границ с применением разных динамических моделей вращательного движения судна и с учетом их инерционно-тормозных характеристик. Получен метод учета навигационных опасностей при выборе маневра расхождения с помощью областей недопустимых значений параметров движения судов, что предусматривает изменение курса одного или обоих судов.

В работе рассмотрены ситуации опасного сближения группы судов, числом более двух, и способы выбора безопасного маневра расхождения в таких ситуациях. Исследован вопрос определения оптимального вектора внешнего управления группой судов, которые опасно сближаются путем минимального изменения их курсов следования.

В работе исследовано предупреждение столкновения судов, домены которых имеют эллиптическую, прямоугольную и сложную формы и получены аналитические выражения для зависимостей предельно - допустимой дистанции сближения от параметров ситуации сближения и формы безопасного домена. Разработана процедура формирования области недопустимых значений параметров движения судов и предупреждения столкновения судов с использованием доменов эллиптической и сложной формы.

В завершение работы представлены результаты проверки корректности полученных методов диссертационной работы. Для этого была разработана имитационная компьютерная программа, состоящая из двух основных модулей, которые обеспечивают выбор маневра расхождения одним из разработанных методов для заданной ситуации

опасного сближения и проигрывание выбранного маневра расхождения, в результате чего делается вывод о его корректности.

Ключевые слова: безопасность судовождения, предупреждение столкновений судов, внешнее управление, аналитические методы предупреждения столкновения судов, маневры расхождения судов общим изменением их параметров движения, области недопустимых параметров.

THE SUMMARY

Burmaka I.O. Development of the theory and methods of external vessel's operation in a situation of a risk of collision. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation paper for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.13 - Navigation and Traffic Control (271 - River and Sea Transport). - National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, 2020.

The paper describes the principles of forming of vessels' collision avoidance of elementary group of vessels, based on the principle of process control of vessel divergence, methods of assessment of close-quarters situation, choice of divergence maneuver and domain form of inappropriate positions.

The possibility of forming of three types of domains is shown: the domain of invalid data of courses of the elementary group of vessels, the domain of invalid data of speeds of the elementary group of vessels, the domain of invalid data of courses of one vessel and speeds of another vessel.

The analytical description of the system of prevention of vessels' collision has been conducted, where the domain of round form is used. The analytical expressions of three types of domains limits of invalid data has been obtained. Computer algorithms of forming and graphic display of all types of domains has been developed, their use for the choice of safe strategy of vessel divergence by the change of parameters of motion of both vessels is shown.

The processed questions of taking into account of vessels' dynamics and navigational dangers at forming of domains of invalid data of motion parameters and calculation of their scopes with the application of different dynamic models of turning motion of the vessel taking into account their inertia-stopping characteristics. The method of taking into account the navigational dangers has been obtained at the choice of divergence maneuver by the domains of invalid data of vessels' motion parameters, which foresees the change of course of one or both vessels.

The cases of dangerous close-quarters situation of a group of more than two vessels and methods of choosing safe divergence maneuver in such cases are considered in the paper. The question of determination of the optimum

vector of external operation of a group of vessels which dangerously approach by the minimum alteration of their courses is explored.

The collision prevention of ships whose domains have elliptical, rectangular and complex forms, are investigated in paper and analytical expressions for maximum allowed distance of approach from the parameters of the approach situation and of safe domain forms are obtained. The procedure of the domain formation of invalid data of vessels' motion is developed and collision prevention using elliptical and complex domains.

In completion of paper the results of verification of accuracy of the dissertation paper results represented, for which the simulation computer program consisting of two basic modules which provide the choice of divergence maneuver by one of the developed methods for a given situation of dangerous close-quarters situation and reproduction of the chosen divergence maneuver, resulting in the conclusion about its accuracy was designed.

Keywords: safety of navigation, prevention of vessels' collision, external operation, analytical methods of prevention of vessels' collision, vessels' divergence maneuvers with the common change of their motion parameters, domains of invalid data.

Підп. до друку 20.01.2021. Формат 60x84/16.
Папір офсет. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,32.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-01-23

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003