МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет "Одеська морська академія"

Піпченко Олександр Дмитрович

УДК 656.61.052

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ПРИ ВИРІШЕННІ КОМПЛЕКСНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

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”

Офіційні опоненти: **Тихонов Ілля Валентинович**
доктор технічних наук, професор, в.о. начальника Київської дільниці водних шляхів філії "Днопоглиблювальний флот" ДП "Адміністрація морських портів України" Міністерства інфраструктури України, м. Київ

Павленко Максим Анатолійович
доктор технічних наук, професор кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків

Богом’я Володимир Іванович
доктор технічних наук, професор кафедри технічних систем та процесів управління в судноводінні Державного університету інфраструктури та технологій

Захист відбудеться 20 квітня 2021 року о 10.00 годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01, у 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 19 березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, д.т.н., професор — Нікольський В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Неухильне зростання світового населення і його потреб ставить перед світовою спільнотою нові споживчі виклики. Саме тому, обсяги перевезень, кількість і тоннаж світового флоту безперервно збільшуються. Крім міжнародної торгівлі стрімко розвивається морський енергетичний сектор - глибоководне буріння, видобуток газу та нафти, створення і використання альтернативних джерел енергії тощо. Інтенсифікація всіх напрямків розвитку людства також зумовлює ускладнення морських операцій, пов'язаних зі збільшенням типів, кількості і розмірів суден, що суттєво збільшує ризики, які відносяться до проведення цих операцій. Статистика аварійності світового флоту показує позитивну тенденцію у бік загального зменшення втрат: факторами зменшення аварійності на суднах з'явилися технологічний прогрес, що спостерігається у всіх областях морської індустрії і регулятивні заходи Міжнародної морської організації (*IMO*). Сумісна дія цих факторів вплинула на поліпшення загальної культури безпеки у судноплавних компаніях і, зокрема, на якість підготовки всіх морських фахівців.

Основною метою у області політики безпеки, сучасні судноплавні компанії визначають нульову кількість аварійних випадків ("*Goal Zero*") і все більша увага ними приділяється не тільки до підвищення комерційної складової загальної ефективності роботи флоту, а й загальної безпеці судноплавства. Але, як тільки постає практично значуще питання про необхідність підвищення комерційної ефективності функціонування флоту, виникає *протиріччя* між дотриманням відповідного рівня безпеки і необхідністю отримання прибутку. Слід відзначити, що, згідно даних Європейської асоціації з морської безпеки, у період з 2011 до 2018 року включно, основними причинами майже 66 % морських інцидентів стали неправильні дії персоналу, а половина від загальної кількості аварій припала на навігаційні інциденти - зіткнення та посадки на мілину.

Таким чином, можна визначити, що актуальність роботи полягає у тому, що у галузі експлуатації морських суден, при дослідженнях і проектуванні сучасних суднових систем і комплексів, у перманентному розвитку теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач, сьогодення вимагає вирішення, суто практичних, наукових проблем:

– підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане з гарантуванням безпеки судноплавства;

– витрати і заходи, спрямовані на гарантування безпеки судноплавства, повинні бути настільки малими, наскільки це не тільки теоретично, а й практично обґрунтовано.

Гіпотезою дослідження є теза: досягнення комплексної ефективності роботи морських суден із одночасним гарантуванням безпеки судноплавства може бути ефективно вирішено шляхом впровадження у практичну діяльність судноводіння методів кількісної оцінки безпеки.

Методологічною основою дослідження є концепція *IMO* "Формалізованої

оцінки безпеки". Для визначених проблем управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач, у дисертації: *а*) наведена і проаналізована статистика аварійності світового флоту за останні роки та ідентифіковані основні причини навігаційних аварій; *б*) уточнена та розширена існуюча термінологія у теорії управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач.

У дослідженні виявлені найважливіші проблеми, що потребують вирішення та урахування сучасній морській індустрії, а саме:

– підвищення автоматизації процесів судноводіння, яке пов’язане з впровадженням у навігацію електронних картографічних навігаційно-інформаційних систем (ЕКНІС) та відмовою від паперових карт;

– значне, непропорційне розмірам сучасних портів, укрупнення флоту, у особливості контейнеровозів;

– загальне зниження кваліфікації командного складу та світові тенденції до зменшення екіпажів суден.

Відзначимо, що гарантування безпеки виконання навігаційних задач є комплексом дій, направлених на зниження ризиків пов’язаних з їх виконанням. Саме для цього у роботі вирішується низка наукових завдань, зокрема:

– оцінювання навігаційної задачі та ідентифікація небезпеки, її планування та імплементація методів зниження ризиків;

– виконання навігаційних задач згідно плану, моніторинг та корегування їх у залежності від існуючих ризиків та показників ефективності виконання плану;

– удосконалення і розробка принципів розрахунку "безпечної глибини" з урахуванням характеристик зон ризику, змінних умов мореплавання і точності картографічної інформації;

– формулювання методу розрахунку операційного ризику навігаційного інциденту;

– розрахункове, модельне (імітаційне) доведення отриманих результатів на конкретних прикладах управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач.

У роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпеки судноплавства засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих, і удосконаленні існуючих, методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018 року) і виконане відповідно до положень Морської доктрини України на період до 2035 року (постанова № 1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, № 1108).

Дисертаційна робота виконана у рамках планових наукових досліджень, зокрема, держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) Херсонської державної морської академії, у яких здобувач є автором окремих розділів:

– ДР № 0117*U*002176 "Створення високоточних інтелектуальних систем управління рухом морських суден військового і цивільного призначення" (2017-2018 р.р.);

– ДР № 0119*U*100948 "Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден" (2019-2020 р.р.).

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності та безпеки судноплавства при вирішенні комплексних навігаційних задач, яка реалізується шляхом вдосконалення та впровадження запропонованих теоретичних засад управління ризиками.

Головні завдання дослідження наступні.

1. Аналіз наукових досліджень та проблем морського транспорту, спрямований на висвітлення основних факторів, що впливають на безпеку судноплавства в умовах новітніх концепцій та стратегії розвитку судноплавної галузі.

2. Збір статистичних даних про основні помилки у практиці судноводіїв, їх категоризація та аналіз.

3. Дослідження та оптимізація математичних моделей процесів судноводіння, спрямованих на вирішення завдань підвищення точності оцінювання навігаційних даних.

4. Розробка методів кількісного оцінювання безпеки судноплавства.

Об'єктом дослідження є процеси безпечної навігації та управління рухом засобів водного транспорту.

Предметом дослідження є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних методів управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач судноводіння.

Методи дослідження. У роботі поєднуються теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з абсолютно новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося нераціональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок удосконалені розрахункові методи і алгоритми, що їх реалізують. Експериментальні методи (тренажери, судна) використані для верифікації математичних моделей, що дозволило максимально наблизити дослідження до вирішення практичних завдань і що підтверджено відповідними актами використання результатів. Дані, отримані у ході експериментальних досліджень і отримані теоретичні результати зіставлені і добре корелюються. Зіставлення підтверджує достовірність отриманих наукових результатів, що одержані за допомогою використаних і запропонованих здобувачем методів, алгоритмів та моделей.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної наукової проблеми підвищення безпечної експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих методів

кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

Наукова цінність дослідження визначається вирішенням основних наукових завдань. Зокрема, здобувачем особисто отримані **нові наукові результати.**

1. Уперше сформульовано критерій оцінювання найкоротшої дистанції розходження суден, *якій відрізняється* урахуванням параметрів судна та куту перетину курсів, *що дозволяє* аргументовано оцінювати небезпеку зіткнення суден.

2. Уперше запропоновано алгоритм розходження судна-цілі з кінцевим буєм сейсмічного кабелю, *який відрізняється* використанням методу зворотного розрахунку розходження суден та урахуванням дрейфу кабелю, *що може використатися* у навігаційних системах підтримки прийняття рішень.

3. Уперше запропоновано категоризацію зон навігаційного ризику та методику визначення запасу під кілем, *яка відрізняється* урахуванням точності картографічної інформації, *що дозволяє* визначити критерії оцінки небезпечності запланованого маршруту судна.

4. Уперше запропоновано метод визначення небезпечного зближення суден та маневру останнього моменту, залежно від маневрених характеристик судна та куту перетину курсів, *який відрізняється* тим, що визначення потенціального контакту суден виконується віддаленням цілі від розрахункової точки зіткнення, *що дозволяє* зменшити кількість можливих небезпечних ситуацій, та у значної мірі уточнити і спростити розрахунки.

5. Уперше запропоновано методику кількісної оцінки ризику навігаційного інциденту, яка заснована на концепції формальної оцінки безпеки та нечіткій логіці і *відрізняється* структурою системи нечіткої логіки, методами нормування вхідних параметрів та обробки правил, *що дозволяє* отримати оцінки навігаційної ситуації для суден з різноманітними розмірами та маневровими характеристиками.

6. Удосконалено алгоритм функціонування контролеру курсу судна, *який відрізняється* використанням запропонованого адаптивного принципу навчання нейронних мереж, *що дозволяє* отримати робастні властивості системи управління курсом судна.

7. Удосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, *який дозволяє* розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, *що дозволяє* розроблювати моделі шлюпок свобідного падіння та інших подібних об’єктів для використання на симуляторах.

8. Удосконалено метод розрахунку безпечної глибини та визначення лімітуючих параметрів при плануванні навігаційного переходу судна, *який відрізняється* урахуванням комплексу параметрів безпеки, у тому числі радіусу повороту, границь безпечної зони та поправок на крен, диферент, щільність води, просідання, точність картографічної інформації та інших чинників, *що дозволяє* об’єктивно і з більшою точністю оцінити запланований маршрут судна.

9. Отримала подальший розвиток класифікація помилок судноводіїв за

результатами небезпечних наближень, зіткнень та посадок суден на мілину, *яка відрізняється* розробленою структуризацією помилок, *що дозволяє* проводити декомпозицію причин морських інцидентів.

10. Отримала подальший розвиток методика верифікації математичної моделі плаского руху судна, *яка відрізняться* формою запису цільових функцій, *що дозволяє* уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

11. Отримала подальший розвиток 6 *DoF* математична модель взаємодії системи буксир-судно пов'язаної тросом, *яка відрізняється* урахуванням остійності та плавучості суден, натягу тросу, функціонування гвинто-рульових колонок, *що дозволяє* створювати симулятори роботи суден з буксирами та оцінювати можливість втрати керованості і остійності буксиру у різних експлуатаційних умовах.

12. Отримала подальший розвиток математична модель сейсмічного судна з буксируваною системою плавучих кабелів великої довжини, *яка відрізняється* урахуванням динаміки руху гнучкого кабелю, *що дозволяє* проводити симуляцію проходження небезпечних ділянок.

Практична цінність дослідження полягає у тому, що отримані у дисертації основні результати можуть використатися при навчанні, перепідготовці і підвищенні кваліфікації судноводіїв, та осіб, які відповідають за планування роботи флоту, під час розробки проектів експлуатації суден, портів, плануванні рейсу судна та моніторингу безпечного виконання процесів судноводіння, а також при розробці алгоритмів та моделей, які є частиною суднових систем підтримки прийняття рішень та навігаційних симуляторів.

Практичні результати дисертаційного дослідження застосовуються під час навчання курсантів та фахівців морського флоту, при підвищенні кваліфікації, зокрема у програмі імітаційного моделювання остійності суден "*Vessel floatation*" (авторське свідоцтво № 77874 від 27.03.2018) та у програмі розрахунку параметрів безпеки маршруту для ЕКНІС (акт від 04.06.2020 р.). Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені у виробничу діяльність судноплавної компанії "*Mediterranean Shipping Services*" (акт від 03.06.2020 р.). Матеріали дисертації використовуються у наукових дослідженнях (акт від 03.06.2020 р.) та навчальному процесі (акт від 03.06.2020) Херсонської державної морської академії (акт від 03.06.2020 р.), зокрема - комп'ютерна програма "*Towing System*" (авторське свідоцтво №72915 від 18.07.2017); у навчальному процесі під час викладання спеціальних дисциплін на кафедрах НУ "ОМА" (акт від 04.06.2020 р.), у навчальному процесі ІПО «Одеський морський тренажерний центр» (акт від 10.06.2020), а також під час спеціальної підготовки судноводіїв (Казахстанська морська академія, акт від 02.06.2020).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу виконано здобувачем самостійно: проведено інформаційний пошук за темою дисертації та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки та ефективності судноводіння, здійснено розробку методологічного забезпечення, отримано рішення всіх задекларованих складових задач і їх синтезом досягнуто рішення

головної задачі дисертації, формалізовані алгоритми та розроблено програмне забезпечення; результати роботи впроваджено у виробничий та навчальний процеси. При практичній реалізації запропонованих рішень, здобувачем, без співавторів, визначені рекомендації до розробки тренажерного обладнання для підготовки судноводіїв; рекомендації з удосконалення навчального процесу, наведені перспективи розвитку систем підтримки прийняття рішень під час виконання навігаційних задач.

У опублікованих у співавторстві наукових роботах, у дисертації використані тільки ті положення і результати, які належать авторові особисто, що наведено у переліку публікацій (до кожної публікації у співавторстві).

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідались, обговорювались, відображені і були схвалені у наступних наукових заходах: 10*th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *Gdynia*, *Poland*, 2011; *INSLC* 17 - *International Navigation Simulator Lecturers' Conference, Hochschule Wismar, Rostock – Warnemuende*, 2012; 13*th International Conference on Engine Room Simulators, Odessa, NU "OMA", September* 20-21, 2017; 13th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Gdynia, Poland, 2019; міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT - 2011)» Херсон, 2011;міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2017», Херсон, 2017; всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова, 2017;науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський і річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення та автоматизація», Одеса: НУ ОМА, 2017;науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація». 14-15.11.2019;міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020», Херсон: ХДМА, 2020.

Публікації. За результатами дослідженння опубліковано 34 наукові праці, (з них 14 – одноосібні). Зокрема, 26 публікацій у наукових профільних виданнях (з них 5 публікацій індексуються у базах даних *Scopus* і *Web of Science*), 2 навчально-наукових посібника, 10 доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 3 публікації, що індексуються у базі даних *Scopus*).

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з анотацій, переліку умовних скорочень, вступу, семі розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 286 сторінок, де, крім основного тексту, містяться 126 рисунків, 22 таблиці. Список використаних джерел містить 290 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено існуючу науково-технічну проблему розробки і синтезу нових та вдосконалення існуючих методів підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане з гарантуванням безпеки судноплавства. Обґрунтовано актуальність теми дисертації, охарактеризовано зв'язки дослідження з національними і галузевими програмами і темами. На основі сформульованого запиту практики визначені наявні наукові протиріччя, що ускладнюють вирішення науково-технічної проблеми управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач. Сформульовано мету, наукові завдання і застосовані методи дослідження, виділені об'єкт і предмет досліджень. Викладено новизну і практичне значення отриманих наукових результатів. Наведено дані про публікації і апробацію результатів роботи, охарактеризовано особистий внесок здобувача. Наведено інформацію про практичне впровадження основних наукових результатів.

У **першому** розділі проведено загальний аналіз стану і наведені існуючі проблеми комплексної задачі підвищення ефективності та гарантування безпеки судноплавства. Систематизовано причини втрат внаслідок навігаційних інцидентів.

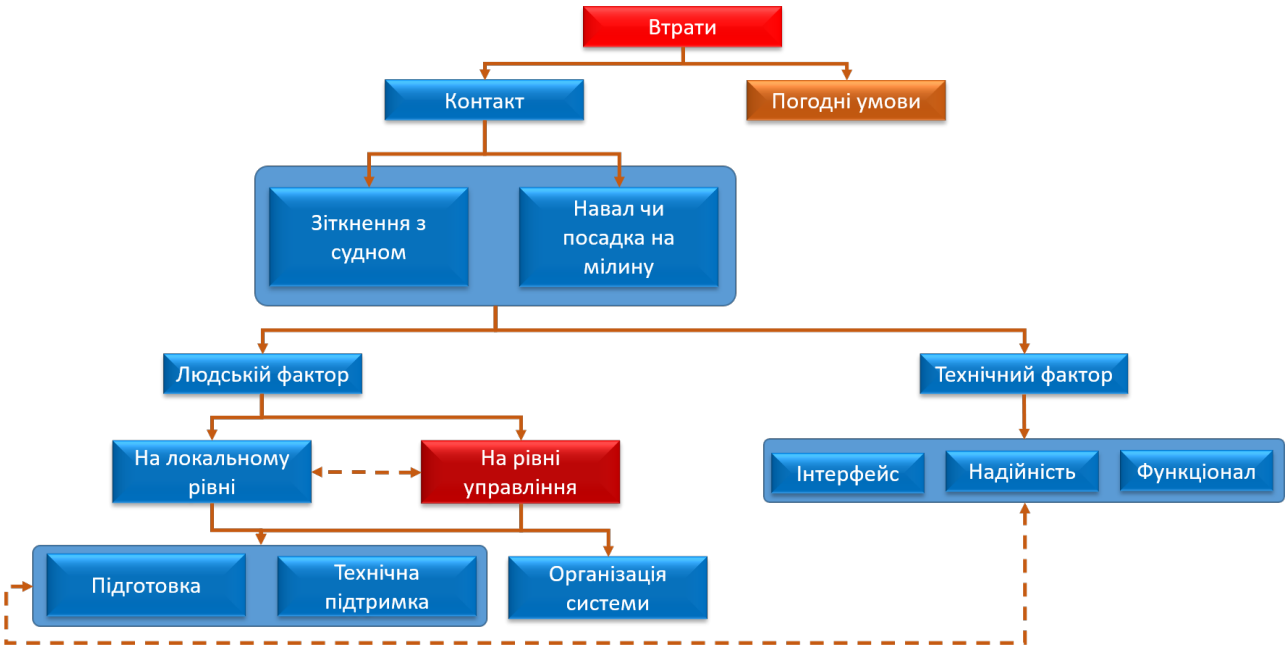


Рисунок 1 - Причини втрат внаслідок навігаційних інцидентів

На базі аналізу навігаційних інцидентів та моделювання складних навігаційних ситуацій під час тренування судноводіїв було сформовано структуру найбільш характерних помилок які можуть привести до зіткнення суден чи посадки на мілину, та сформовані відповідні дерева помилок (рис. 2).

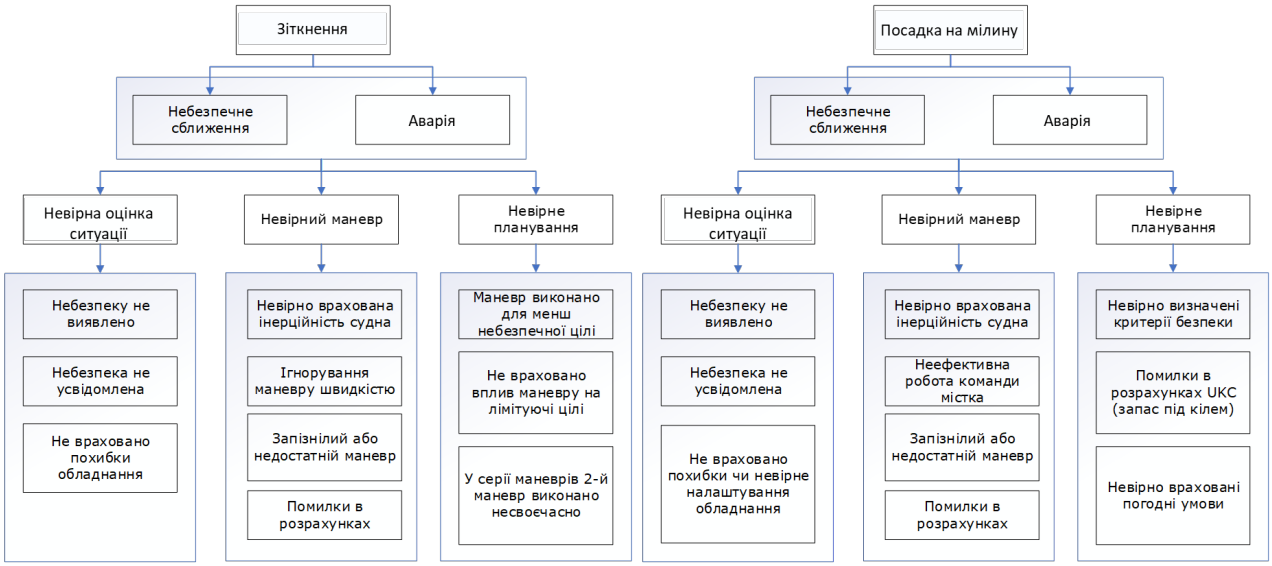


Рисунок 2 - Структура помилок, які можуть призвести до зіткнення (ліворуч) чи посадки на мілину (праворуч).

Встановлено, що ця задача вимагає вирішення, суто практичних, наукових проблем:

– підвищення комплексної ефективності роботи морських суден, яке повинно бути тісно пов'язане з гарантуванням безпеки судноплавства;

– витрати і заходи, спрямовані на гарантування безпеки судноплавства, повинні бути настільки малими, наскільки це не тільки теоретично, а й практично обґрунтовано.

Проаналізовану структуру процесу планування операцій (рис. 3.) та висунуто *гіпотезу*, що досягнення комплексної ефективності роботи морських суден із одночасним гарантуванням безпеки судноплавства може бути ефективно вирішено шляхом впровадження методів кількісної оцінки безпеки.

Рисунок 3 - Фактори які впливають на ефективність та безпеку навігаційних задач

Обґрунтовано основний напрям дослідження: підвищення ефективності та безпеки судноплавства при вирішенні комплексних навігаційних задач, яка реалізується шляхом вдосконалення та впровадження теоретичних засад управління ризиками. Визначено, що **комплексна навігаційна задача, це** діяльність судна або групи суден, яка направлена на досягнення поставленої цілі.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений вибору теми та основних напрямів та «технології» наукового дослідження.

Наводиться характеристика методологічного обґрунтування роботи, вказана мета дисертаційного дослідження і представлена його головна задача. Зроблено декомпозицію головної задачі на складові. Доведена значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, а також сформульоване основне наукове положення роботи.

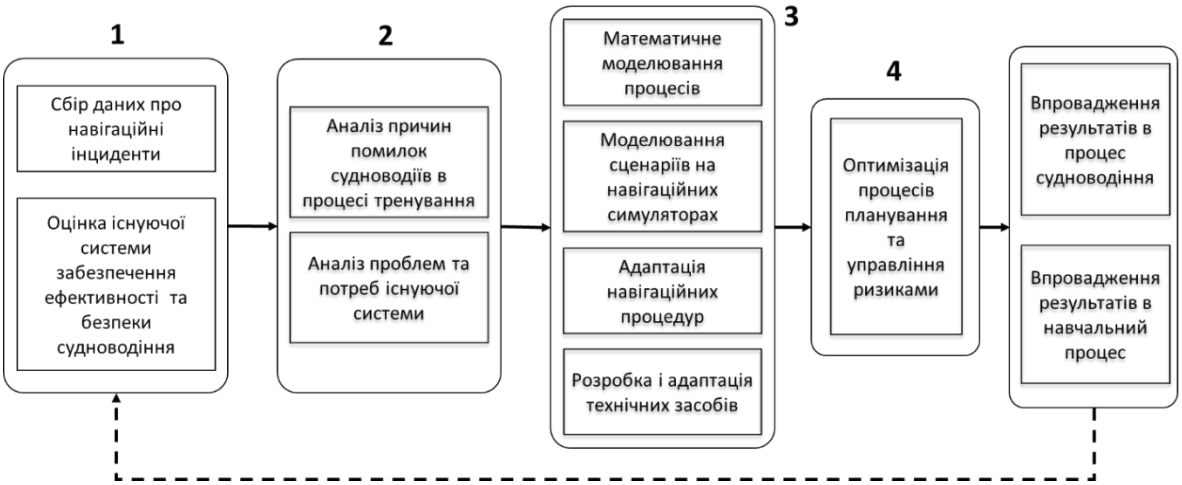


Рисунок 4 - Технологія підвищення навігаційної безпеки

Приведена скорочена методика рішення складових задач, поставлених у роботі, де описані основні етапи виконання наукового дослідження за темою дисертації та включено теоретичні розробки зі проведення імітаційного комп'ютерного моделювання.

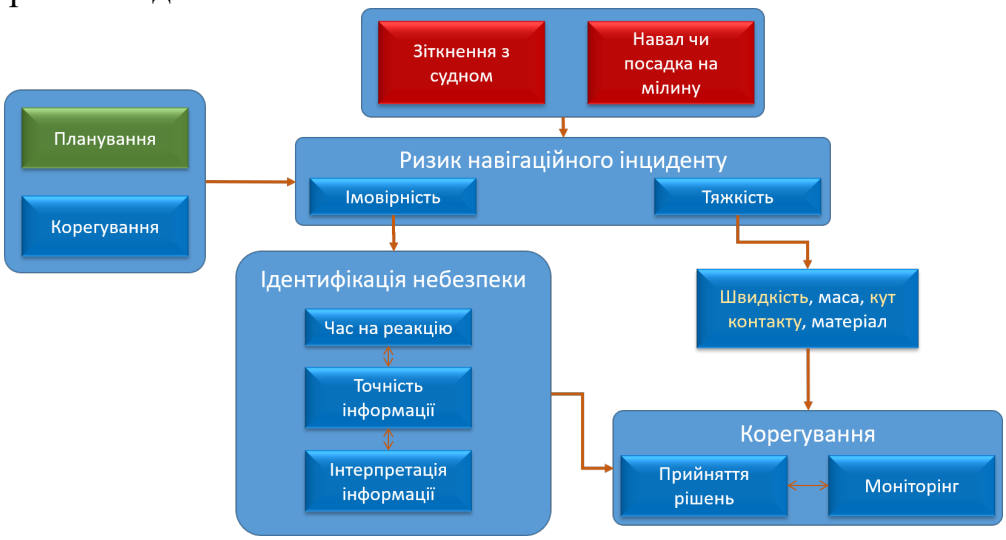


Рисунок 5 - Управління ризиками та гарантування безпеки виконання навігаційних задач

У **третьому** розділі досліджено та удосконалено низку методів математичного моделювання руху судна у просторі. У цілому модель руху судна представлена виразом:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = g_o + \tau_w + \tau_c \qquad (1)$$

де M – матриця інерції системи (з урахуванням приєднаних мас); $C(v)$ - узагальнена коріолісова центробіжна матриця (включаючи приєднані маси); $D(v)$ – матриця тертя; $g(\eta)$ – вектор сил і моментів ваги і плавучості; τ_c- результуючий вектор керуючих сил; g_o – вектор удіфференутування (управління баластом); τ_w – результуючий вектор зовнішніх сил; $v = [u,v,w,p,q,r]^T$ – вектор лінійних і кутових швидкостей судна; $\eta = [x_n,y_n,z_n,\varphi,\theta,\psi]^T$ – вектор позиції і орієнтації судна.

Рисунок 6 - Схема моделювання руху судна при рішенні навігаційних задач

У розділі доведено, що з огляду на нелінійність і багатоваріантність процесу руху судна в просторі доцільно, у залежності від поставленого конкретного навігаційного завдання, використовувати такі моделі:

– *лінійна модель керування курсом*, яка використовується для уточнення та адаптації алгоритмів регулювання курсу та удержання судна на траєкторії;

– *лінійна модель маневрування судна*, для діапазону швидкостей менших ніж 1 м/с для систем удержання судна в позиції;

– *нелінійна модель маневрування судна*, яка використовується для діапазону швидкостей від 1 м/с;

– *лінійна модель хитавиці судна* у 6 ступенях свободи, яка використовується для розрахунку амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) руху у лінійному діапазоні для оцінки амплітуд хитавиці, для оптимізації маршруту судна, при проектуванні каналів та фарватерів, а також при плануванні операцій судна на малих глибинах.

– *нелінійна модель хитавиці судна* у 6 ступенях свободи, яка служить для

розрахунків динаміки у особливих режимах (коливання остійності, параметричний резонанс, брочинг та інших).

На рис. 6 представлено узагальнену схему моделювання руху судна при рішенні навігаційних задач.

Систему рівнянь, що описує рух судна на площині представлено як:

$$\left.\begin{array}{c}(m+m_x)\dot{u}_G-(m+m_y)v_G r_G=X\\(m+m_y)\dot{v}_G+(m+m_x)u_G r_G=Y\\(I_{zz}+J_{zz})\dot{r}_G=N-x_G Y\end{array}\right\}, \qquad (2)$$

При цьому доповнена система з урахуванням кріну судна, представлено наступним чином:

$$\left.\begin{array}{c}(m+m_{11})\dot{u}_G-(m+m_{22})v_G r_G=X\\(m+m_{22})\dot{v}_G+(m+m_{11})u_G r_G=Y\\(I_{44}+J_{44})\dot{p}_G=K\\(I_{66}+J_{66})\dot{r}_G=N-x_G Y\end{array}\right\}, \qquad (3)$$

де m – водотоннажність судна; m_{11}, m_{22} – приєднані маси, I_{44}, I_{66} – моменти інерції, J_{44}, J_{66} – приєднані моменти інерції, u_G, v_G, p_G, r_G – поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості відносно поперечної і вертикальної осей відносно центру ваги судна відповідно; X, Y, K, N – гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

Лінійну модель хитавиці судна представлено системою:

$$\left.\begin{array}{l}\left(\rho\nabla+a_{11}\right)\cdot\ddot{x}+b_{11}\cdot\dot{x}+a_{13}\cdot\ddot{z}+b_{13}\cdot\dot{z}=X_{w1},\\\left(\rho\nabla+a_{22}\right)\cdot\ddot{y}+b_{22}\cdot\dot{y}+a_{24}\cdot\ddot{\varphi}+b_{24}\cdot\dot{\varphi}+a_{26}\cdot\ddot{\psi}+b_{26}\cdot\dot{\psi}=X_{w2},\\\left(\rho\nabla+a_{33}\right)\cdot\ddot{z}+b_{33}\cdot\dot{z}+c_{33}\cdot z+a_{35}\cdot\ddot{\theta}+b_{35}\cdot\dot{\theta}+c_{35}\cdot\theta=X_{w3},\\a_{42}\cdot\ddot{y}+b_{42}\cdot\dot{y}+\left(I_{xx}+a_{44}\right)\cdot\ddot{\varphi}+b_{44}\cdot\dot{\varphi}+c_{44}\cdot\varphi+a_{46}\cdot\ddot{\psi}+b_{46}\cdot\dot{\psi}=X_{w4},\\a_{51}\cdot\ddot{x}+b_{51}\cdot\dot{x}+a_{53}\cdot\ddot{z}+b_{53}\cdot\dot{z}+c_{53}\cdot z+\left(I_{yy}+a_{55}\right)\cdot\ddot{\theta}+b_{35}\cdot\dot{\theta}+c_{35}\cdot\theta=X_{w5},\\a_{62}\cdot\ddot{y}+b_{62}\cdot\dot{y}+a_{64}\cdot\ddot{\varphi}+b_{64}\cdot\dot{\varphi}+\left(I_{zz}+a_{66}\right)\cdot\ddot{\psi}+b_{66}\cdot\dot{\psi}=X_{w6}.\end{array}\right\} \qquad (4)$$

де a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} – коефіцієнти, що характеризують відповідно інерційну, демпфувальну і відновну складові моделі; θ, φ, ψ – кути кільової, бортової хитавиці та рискання; x, y, z – поздовжнє, поперечне і вертикальне переміщення; X_{wi} – зовнішні сили і моменти, викликані хвилюванням.

Модель хитавиці судна з нелінійними елементами запропоновано представити у вигляді системи:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(\rho\tilde{\nabla}+a_{11}\right)\cdot\ddot{x}+\left(b_{11}+b_{11v}\right)\cdot\dot{x}+a_{15}\cdot\ddot{\theta}+b_{15}\cdot\dot{\theta}=X_{w1},\\
&\left(\rho\tilde{\nabla}+a_{22}\right)\cdot\ddot{y}+b_{22}\cdot\dot{y}+a_{24}\cdot\ddot{\varphi}+b_{24}\cdot\dot{\varphi}+a_{26}\cdot\ddot{\psi}+b_{26}\cdot\dot{\psi}=X_{w2},\\
&\left(\rho\tilde{\nabla}+a_{33}\right)\cdot\ddot{z}+b_{33}\cdot\dot{z}+c_{33}\cdot z+a_{35}\cdot\ddot{\theta}+b_{35}\cdot\dot{\theta}+c_{35}\cdot\theta=X_{w3},\\
&a_{42}\cdot\ddot{y}+b_{42}\cdot\dot{y}+\left(\tilde{I}_{xx}+a_{44}\right)\cdot\ddot{\varphi}+\left(b_{44}+b_{44v}\right)\cdot\dot{\varphi}+M_B\left(\overline{\eta},\overline{\zeta},z\right)+a_{46}\cdot\ddot{\psi}+b_{46}\cdot\dot{\psi}=X_{w4},\\
&a_{51}\cdot\ddot{x}+b_{51}\cdot\dot{x}+a_{53}\cdot\ddot{z}+b_{53}\cdot\dot{z}+c_{53}\cdot z+\left(\tilde{I}_{yy}+a_{55}\right)\cdot\ddot{\theta}+b_{35}\cdot\dot{\theta}+c_{35}\cdot\theta=X_{w5},\\
&a_{62}\cdot\ddot{y}+b_{62}\cdot\dot{y}+a_{64}\cdot\ddot{\varphi}+b_{64}\cdot\dot{\varphi}+\left(\tilde{I}_{zz}+a_{66}\right)\cdot\ddot{\psi}+b_{66}\cdot\dot{\psi}=X_{w6}
\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

З метою отримання достовірних математичних моделей руху судна на основі експериментальних даних, запропоновано методику верифікації математичної моделі плаского руху судна. Модель відрізняться формою запису цільових функцій, що дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

Уточнення математичної моделі виконується у два послідовні етапи: *а*) уточнення моделі хідкості судна; *б*) уточнення моделі маневрування.

Це пов'язано з тим, що на етапі корегування моделі хідкості варіювання коефіцієнтів здійснюється тільки за одним ступенем свободи (у одному диференціальному рівнянні) та дозволяє зменшити ступень невизначеності при корегуванні моделі у цілому. Для корегування швидкісно-гальмових характеристик судна запропоновано наступну цільову функцію:

$$Z=w_1\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{Tn}-U_{Sn}\right|}{N}+w_2\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{CSTn}-U_{CSSn}\right|}{N}+w_3\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|U_{ISTn}-U_{ISSn}\right|}{N}+w_4\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|D_{CSTn}-D_{CSSn}\right|}{N}+w_5\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|D_{ISTn}-D_{ISSn}\right|}{N}, \qquad (6)$$

де D – пройдена дистанція, w – ваговий коефіцієнт, індекс CS – активне гальмування, IS – інерційне гальмування, U_T – швидкість, виміряна при випробуваннях, U_S – швидкість, отримана в результаті симуляції.

Цільова функція використана для оптимізації є комплексною функцією отриманою на базі ряду неоднорідних параметрів, а саме:

$$Z = Z_D + Z_K + Z_Z, \qquad (7)$$

де Z_D - динамічна складова, Z_K - кінематична складова (поворотливість), Z_Z - кінематична складова (удержання на курсі).

$$Z_D = w_1\frac{\sum_{n=1}^{N}|U_{Tn}-U_{Sn}|}{N}+w_2\frac{\sum_{n=1}^{N}|r_{Tn}-r_{Sn}|}{N}; \qquad (8)$$

$$Z_K = w_3 \left(\frac{max(X_T) - max(X_S)}{max(X_T)} + \frac{max(Y_T) - max(Y_S)}{max(Y_T)} \right) + w_4 \frac{\sum_{n=1}^{N} \Delta D}{N \cdot max(X_T)}; \quad (9)$$

$$\Delta D = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2}; \quad (10)$$

$$Z_Z = w_5 \left(\left| \frac{\Delta\psi_1^T - \Delta\psi_1^S}{\Delta\psi_1^T} \right| + \left| \frac{\Delta\psi_2^T - \Delta\psi_2^S}{\Delta\psi_2^T} \right| \right); \quad (11)$$

де ΔD – похибка позиції; w_i – ваговий коефіцієнт; індекс T – дані випробувань; індекс S – дані розрахунків; max(X_T) – позиція, що характеризує тактичний діаметр циркуляції; max(Y_T) – позиція, що характеризує висув; $\psi_{1,2}$ – 1-й та 2-й кути одержування.

На рис. 8 відображена блок-схема алгоритму коригування коефіцієнтів моделі руху судна.

Четвертий розділ присвячено рішенню допоміжних задач, пов'язаних з моделюванням руху судна, таких як розрахунок динамічної остійності судна на довільному профілі хвильової поверхні, урахування крену судна у моделях плаского руху та управління судном на траєкторії.

Удосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок свободного падіння та інших подібних об'єктів для використання на симуляторах.

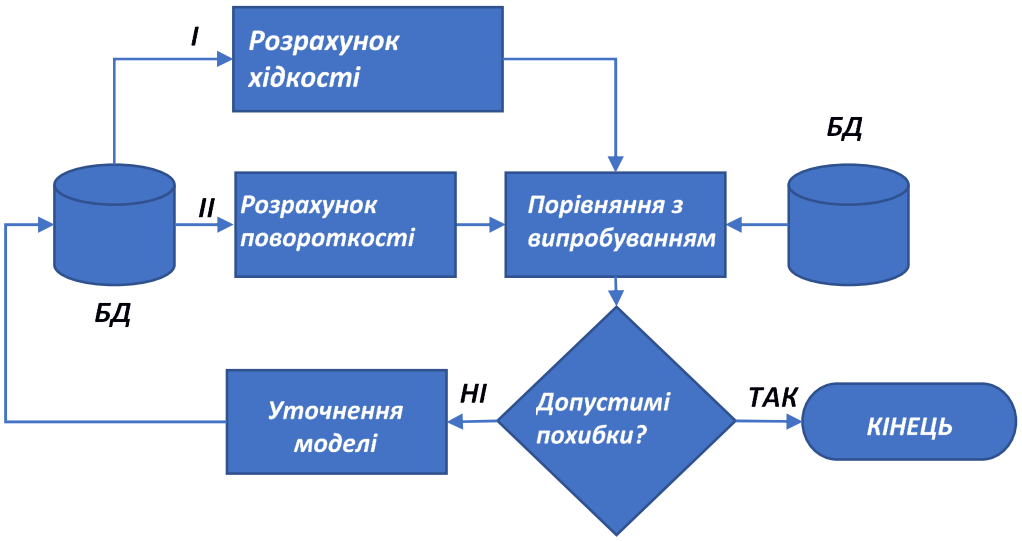


Рисунок 7 - Блок-схема алгоритму уточнення математичної моделі руху судна

Виходячи з формули відновного моменту по поздовжній осі:

$$M_R = g \cdot \nabla(\eta, \zeta, z_h) \cdot \rho \cdot GZ(\eta, \zeta, z_h), \quad (12)$$

де $\nabla(\bar{\eta},\bar{\zeta},z), GZ(\bar{\eta},\bar{\zeta},z)$ - об'ємна водотоннажність і плече остійності судна, що залежать від посадки і положення судна на профілі хвилі; g – прискорення вільного падіння.

Плече статичної остійності GZ визначається за формулою:

$$GZ = y_{CB} \cdot \cos\theta + z_{CB} \cdot \sin\theta - z_{CG} \sin\theta \qquad (13)$$

З формули видно, що для твердого тіла, яким є судно за умови незміщення вантажу, центр ваги в процесі руху можна прийняти як константу. Плече відновного моменту по поздовжній осі, в даному випадку, буде залежати від кута крену і положення центру величини (центру прикладання сил плавучості), який в свою чергу залежить від конфігурації зануреної частини корпусу.

Положення центру величини визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}
&x_{CB} = M_{yz} / V;\ \ y_{CB} = M_{xz} / V;\ \ z_{CB} = M_{xy} / V;\\
&V = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(y^R - y^L\right) \cdot dz \cdot dx;\\
&M_{yz} = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(y^R - y^L\right) \cdot x \cdot dz \cdot dx;\\
&M_{xz} = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(\left(y^R\right)^2 - \left(y^L\right)^2\right) \cdot dz \cdot dx;\\
&M_{xy} = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \left(y^R - y^L\right) \cdot z \cdot dz \cdot dx,
\end{aligned} \qquad (14)$$

Для оцінювання безпеки низки навігаційних задач окрім плаского руху судна потрібно також знати кут бортового нахилення, який може виникнути під час маневру. Це актуально для буксирних суден які мають гнучке з'єднання з об'єктом буксирування, для суден з великою ординатою центру ваги відносно центру підтримки води та для оцінки потенційного нахилу судна при виконанні поворотів на мілководді.

Рівняння бортових коливань судна під час маневрування можна записати як

$$(I_{kk} + J_{kk})\dot{p}_G = a_{42} \cdot \dot{v}_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - b_{44v} \cdot p_G - c_{44} \cdot \varphi - K \qquad (15)$$

де I_{44} – момент інерції відносно повздовжньої осі, v_G – швидкість поперченого зміщення, p_G, r_G – кутові швидкості відносно повздовжньої та вертикальної

осей відносно центру ваги судна; K – сумарний кренувальний момент, a – коефіцієнти інерційних сил; b – коефіцієнти демпфуючих сил; c – коефіцієнт відновлюючих сил, φ – кут крену; індекси *1,2,3* – відповідають лінійним переміщенням по поздовжній, поперечній і вертикальній осях; індекси *4,5,6* – відповідають обертальним рухам відносно поздовжньої (крен), поперечної (диферент) і вертикальної (рискання) осей судна.

В роботі отримані методи розрахунку коефіцієнтів рівняння (15) та компонентів сумарного кренувального моменту K залежно від задачі.

Окремо виділене *керування судном на траєкторії* як один із критичних елементів гарантування безпеки судноводіння.

Запропоновано закон керування судном структурно схожий на ПД-закон, але реалізований на базі штучних нейронних мереж прямого поширення зі зворотним зв'язком по різниці курсів, швидкості зміни різниці курсів та фактичному положенню пера керма (Рисунок 8 -) виду:

$$\delta_з = max\left(-\partial_{lim}, min\left(\partial_{lim}, C_P^{nn} f(\Delta\bar{\psi}) + C_D^{nn} f\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt}\right) + C_\delta^{nn} f(\bar{\delta})\right)\right), \quad (16)$$

$$f(\Delta\bar{\psi}) = \sum_{i=1}^{NS} a_i^{\Delta\psi} th\left(\Delta\bar{\psi} \cdot b_i^{\Delta\psi}\right),$$

$$f\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt}\right) = \sum_{i=1}^{NS} a_i^r th\left(\frac{d\bar{\psi}}{dt} \cdot b_i^r\right), \quad (17)$$

$$f(\bar{\delta}) = \sum_{i=1}^{NS} a_i^\delta th(\bar{\delta} \cdot b_i^\delta),$$

де $\overline{\Delta\psi}$, $\frac{d\bar{\psi}}{dt}$, $\bar{\delta}$ – нормалізовані значення відхилення від заданого курсу, швидкості зміни відхилення та кута пера керма відповідно; *a, b* – коефіцієнти; *NS* – розмірність нейрона.

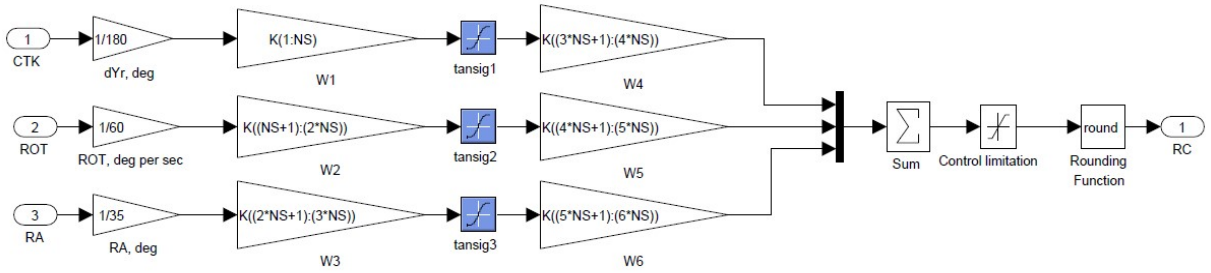


Рисунок 8 - Блок-схема нейронного регулятору курсу для судна зі стандартним гвинто-стерновим комплексом

Це з одного боку дозволяє застосовувати стандартні алгоритми фільтрації вимірювань і адаптації до коефіцієнтів ПД закону, а з іншої сторони "зберігати" в матричному вигляді "пам'ять" про різні режими управління, за рахунок

коефіцієнтів нейронної мережі.

На основі реалізованих автором в середовищі MATLAB Simulink імітаційних моделей суден з можливістю переключення на автостернові з відмінними алгоритмами генерації керуючого сигналу було виконано аналіз ефективності як референс-моделей так і законів керування курсом судна.

Ключовим процесом розробки ефективного нейронного контролера є його адаптація (навчання) до судна.

За умови, що контролером можуть задаватися максимальні керуючі впливи, максимальна ефективність управління досягається при мінімумі відхилень від курсу і перекладок стерна на всьому діапазоні завдань, що може бути відображено цільовою функцією виду:

$$Z = \sum_{n=1}^{N}\left[\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{\Delta\psi_t}{max(|\Delta\psi_n(1,T)|)}\right)^2 + w_\delta \cdot \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{\delta_t}{max(|\delta_n(1,T)|)}\right)^2\right] \qquad (18)$$

де $\Delta\psi_t$ – відхилення від заданого курсу в момент часу t; δ_t – відхилення пера стерна від нульового положення в момент часу t; w_δ – ваговий коефіцієнт; T – загальний час виконання маневру і стабілізації на заданому курсі, який обирається з урахуванням інерційних характеристик судна; N – загальна кількість завдань.

Найважливішим елементом алгоритму адаптації, який дозволяє отримати матриці коефіцієнтів a та b є форма функції завдання, а саме залежність завданого курсу від часу.

Функція завдання запропонована у формі геометричної прогресії:

$$\begin{gathered}\psi_з(n,t) = \psi_0 + \frac{\Delta\psi_n(t)}{(-1)^{n-1}},\\ \Delta\psi_n = 1;\ n = 0,\\ \Delta\psi_n = 5;\ n = 1,\\ \Delta\psi_n = 2\Delta\psi_{n-1};\ n \in (2,N),\end{gathered} \qquad (19)$$

де n змінюється з часом із заданою дискретністю рівною T.

Запропоновано модифікацію алгоритму автостернового для суден з азимутальними рушіями, а саме асинхронний режим використання 2-х стернових гвинто-рульових колонок.

$$\left.\begin{matrix}\delta_P = \delta_з\\ \delta_S = 0\end{matrix}\right\} \text{ при } \Delta\overline{\psi} < 0, \qquad (20)$$

$$\left.\begin{matrix}\delta_P = 0\\ \delta_S = \delta_з\end{matrix}\right\} \text{ при } \Delta\overline{\psi} > 0,$$

Обмеження кутової швидкості автостернового запропоновано у вигляді

$$\left.\begin{matrix}\delta_з^* = \delta_з + C_r\Delta r^3,\\ \Delta r = sign(r)\cdot r_{lim} - r, \text{при } |r| > r_{lim} \text{ та } sign(\Delta\overline{\psi}) = sign(r)\\ \Delta r = 0, \text{при } |r| < r_{lim} \text{ чи } sign(\Delta\overline{\psi}) \neq sign(r)\end{matrix}\right\}, \quad (21)$$

де r – кутова швидкість судна відносно вертикальної осі, r_{lim} – обмеження кутової швидкості, C_r – коефіцієнт для настройки закону управління.

Модифікації алгоритмів керування приведені у формулах (20), (21) дозволяють зменшити автоколивання судна навколо завдання та в цілому роботу рульового пристрою при виконанні маневрів.

П'ятий розділ присвячено математичному моделюванню навігаційних задач як системи із групи суден чи інших об'єктів.

Для реалізації задач описаних у п`ятому розділі необхідно було розробити віртуальне середовище, у якому можуть взаємодіяти групи суден та інші об'єкти. Що було реалізовано на програмному забезпеченні Matlab R2014 та Unity 2020.1.1.17f1.

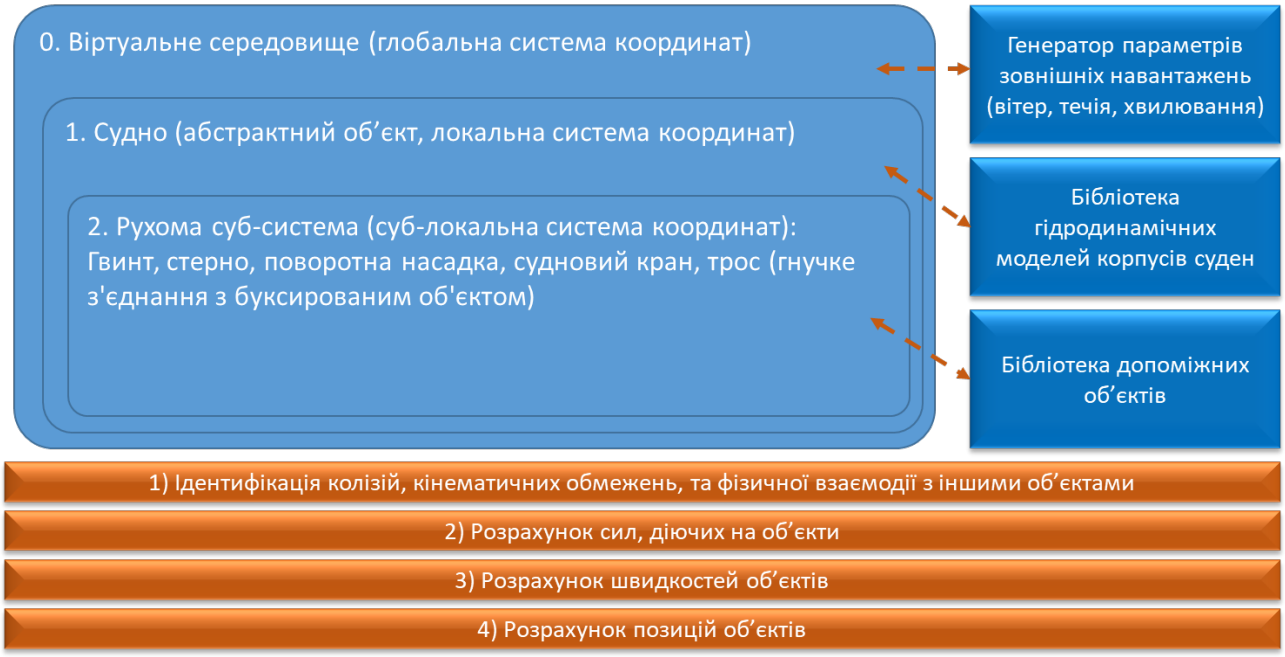


Рисунок 9 - Схема програмної реалізації групи суден в середовищі симулятора методами об'єктно орієнтованого програмування

Для того щоби промоделювати взаємодію групи суден при вирішенні комплексної навігаційної задачі було використано методи об'єктно

орієнтованого програмування з декількома основними видами абстрактних об’єктів таких як

- **віртуальне середовище** – об’єкт який включає в себе взаємодію усіх інших об’єктів: динамічних (судна, водна поверхня, інші рухомі об’єкти) та статичних (елементи навігаційної обстановки);
- **судно** – рухомий об’єкт, якому присвоєна низка якостей та методів, з загальної фізичною структурою згідно до рівняння (1). Сили, діючи на судно розраховуються у зв’язаною з його центром ваги системою координат;
- **допоміжні об’єкти,** таки як, наприклад, рушії судна, трос, який пов’язує судна, підйомний кран, реалізуються окремо, та, при необхідності, мають свою локальну систему координат.

Описані об’єкти пов’язані функціональними зв’язками з бібліотеками моделей, які в залежності від обраних параметрів визначають форму функціональних залежностей, які служать для розрахунку сил взаємодії, швидкостей та позицій об’єктів.

Важливим етапом, який передує розрахунку сил, є визначення колізій, кінематичних обмежень, і сил взаємодії, що буде перешкоджати віртуальному "проходженню" об'єктів крізь один одного і нескінченного розтягування гнучких зв'язків.

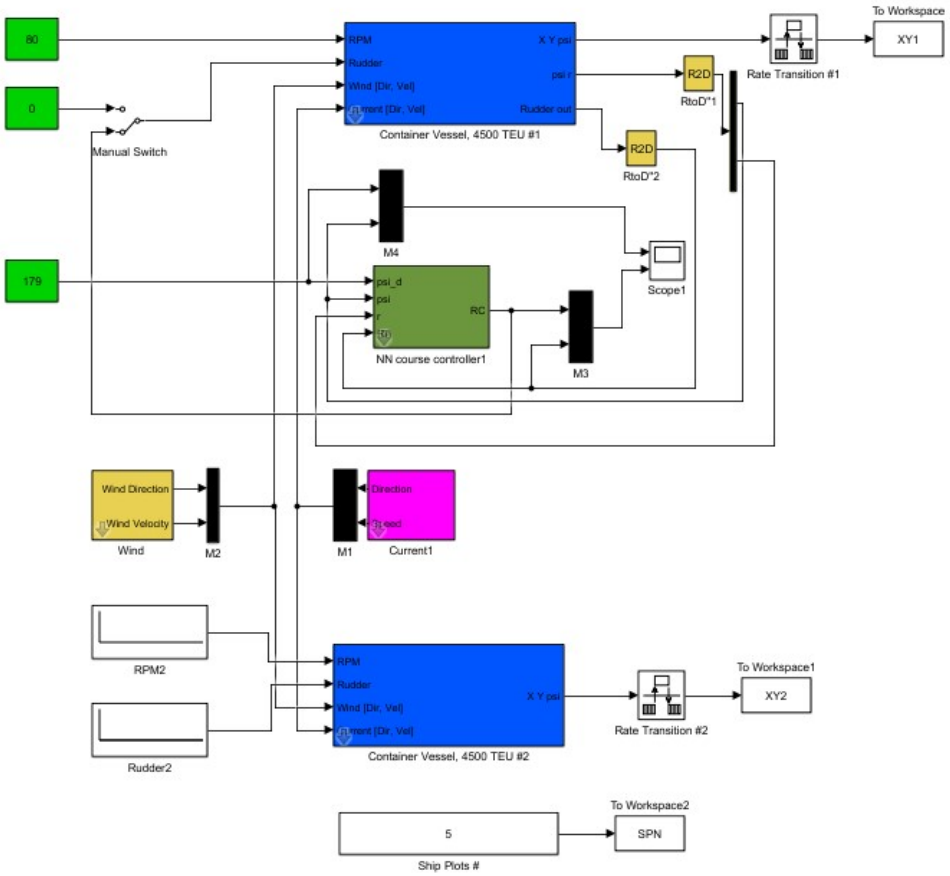


Рисунок 10 - Блок-схема системи взаємодії двох великотоннажних суден у середовищі Matlab Simulink

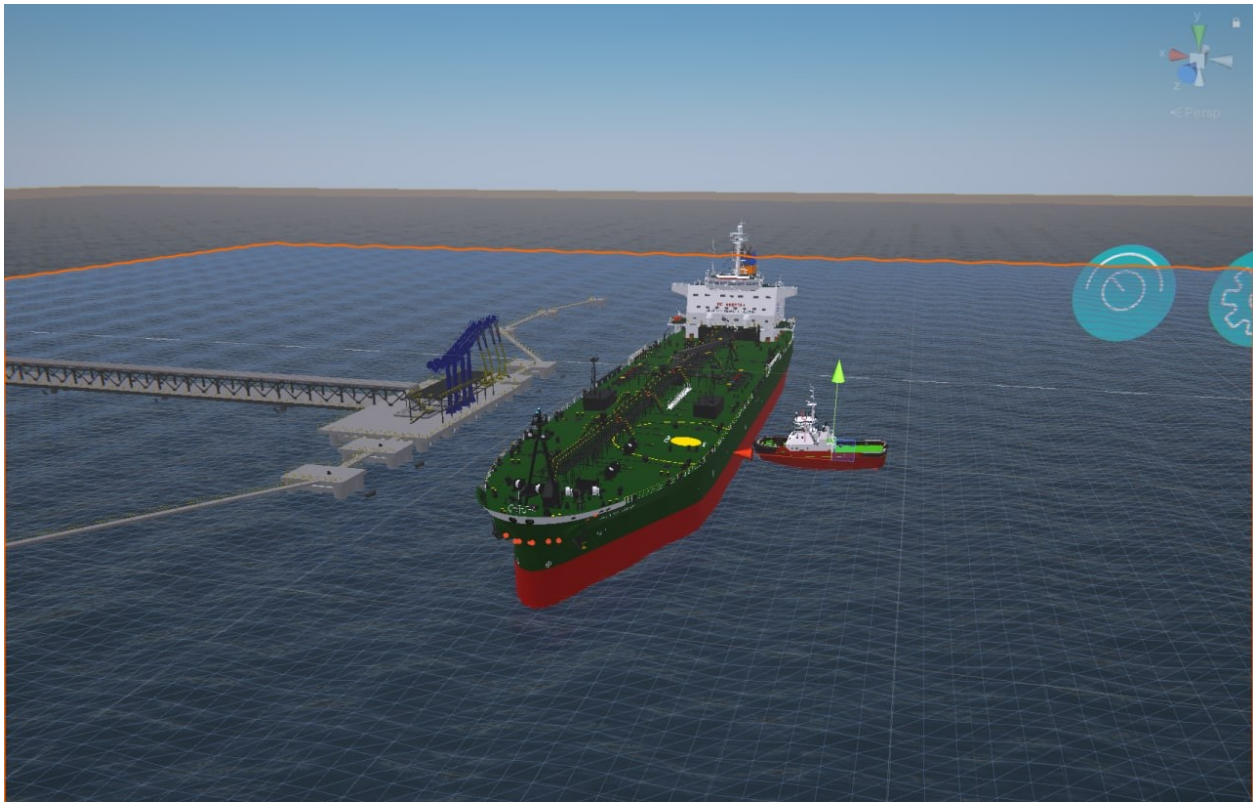


Рисунок 11 - Сцена з навігаційного симулятору у середовищі Unity

У розділі отримано математичну модель системи судно-буксир для буксирів класичного типу (одно- чи двохгвинтові) та буксирів з гвинто-рульовими колонками.

Наступна система рівнянь описує рух буксира:

$$\left.\begin{array}{c}(m+m_{11})\dot{u}-(m+m_{22})vr=X\\(m+m_{22})\dot{v}+(m+m_{11})ur=Y\\(I_{44}+J_{44})\dot{p}=K\\(I_{66}+J_{66})\dot{r}=N-x_GY\end{array}\right\} \qquad (22)$$

де m – масова водотоннажність судна; m_{11}, m_{22} – приєднані маси, I_{44}, I_{66} – моменти інерції, J_{44}, J_{66} – приєднані моменти інерції, u, v, p, r – поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості відносно поперечної і вертикальної осей відносно центру ваги судна відповідно; X, Y, K, N – гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

У розгорнутому вигляді гідродинамічні сили і моменти представимо як:

$$\left.\begin{array}{c}X=X_H+X_P+X_{TL}\\Y=Y_H+Y_P+Y_{TL}\\K=K_H+K_P+K_{TL}+K_{ROLL}\\N=N_H+N_P+N_{TL}\end{array}\right\} \qquad (23)$$

де індекси: *H* – корпус; *P* – узагальнена сила гвинто-стернової групи; *TL* – натяг буксирної лінії; *ROLL* – відновлюючий момент і інерція.

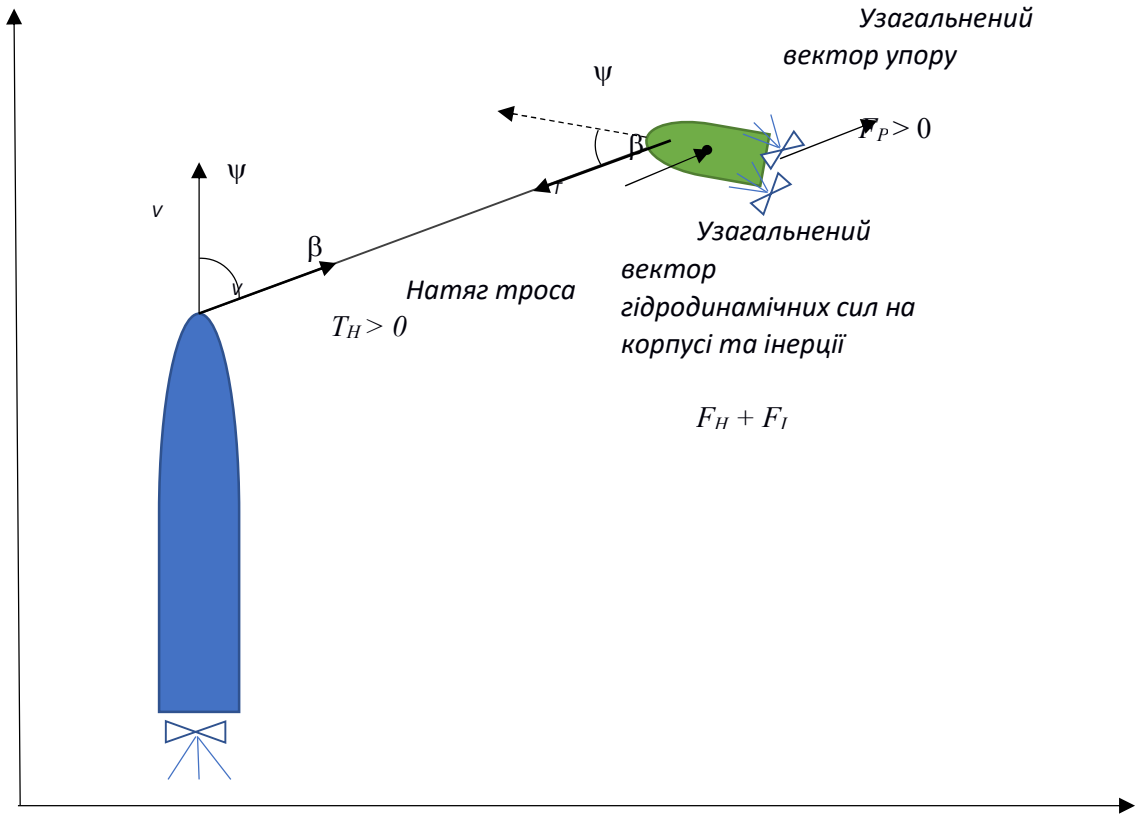


Рисунок 12 - Спрощена схема взаємодії судна з буксиром

Розрахунок натягу буксирної лінії починається при виході на задану довжину l_{TL}. Якщо відстань між точками закріплення троса на суднах менше заданої довжини, натяг F_T дорівнює нулю.

Для того щоб зусилля буксира передалося на натягнутий трос, рівнодійна сил R, створюваних буксиром повинна не дорівнювати нулю і бути спрямованою в сторону від об'єкта, що буксирується.

$$\left.\begin{array}{l} F_{TX} = 0 \; при \\ R_X < 0 \vee \beta_T \in \left(-\dfrac{\pi}{2};\dfrac{\pi}{2}\right) \vee x_T \geq 0 \\ R_X > 0 \vee \beta_T < -\dfrac{\pi}{2} \vee \beta_T > \dfrac{\pi}{2} \vee x_T < 0 \end{array}\right\} \qquad (24)$$

$$\left.\begin{array}{l} F_{TY} = 0 \; при \\ R_Y > 0 \vee \beta_T \in (0;\pi) \\ R_Y < 0 \vee \beta_T \in (-\pi;0) \end{array}\right\} \qquad (25)$$

Поздовжня і поперечна складові рівнодійної R передаються на трос по його напрямку, створюючи натяг F_T:

$$\begin{gathered} F_{TX} = R_X \cdot \cos\beta_T; F_{TY} = R_Y \cdot \sin\beta_T \\ F_T = F_{TX} + F_{TY} + F_{TV} \end{gathered} \tag{26}$$

де F_{TV} – додатковий натяг, створюваний судном-об'єктом.

Сили реакції в цьому випадку виражаються як:

$$\begin{aligned} X_T &= F_T \cdot \cos\beta_T \\ Y_T &= F_T \cdot \sin\beta_T \\ N_T &= Y_T \cdot x_T \\ K_T &= Y_T \cdot \left(z_T - z_G\right) \end{aligned} \tag{27}$$

У момент виходу буксира на довжину троса відбувається ривок, в результаті якого швидкості буксира та об'єкта, що буксирується, вирівнюються. Для того щоб трос «віртуально» не розтягувався, було введено кінематичну умову:

$$\left.\begin{array}{l} при\ l_{TP} > l_{TL} - \dfrac{dl_{TP}}{dt} \\ u - \dfrac{dl_{TP}}{dt}\cos\beta_T \\ v + \dfrac{dl_{TP}}{dt}\sin\beta_T \end{array}\right\} \tag{28}$$

Тобто, якщо швидкість подовження троса позитивна при досягненні його максимальної довжини, вона віднімається зі швидкості буксира по відповідних осях.

Автором була розроблена математична модель контейнеровоза класу панамакс розміром (L / B / d): 282 / 32,2 / 12,2 м. Сили реакції на буксирному тросі розраховуються на базі рівнянь (24)-(28).

Результати моделювання системи буксир-судно відображені на рис. 13-14. На рис. 13 відображені різні режими буксирування (з носової та кормової лебідки). На рис. 14 відображена ситуація «гіртинг» зі значним накренением буксира (-75°), що відповідає куту заходу діаграми статичної остійності і перевищує кут затоплення (60°) для даного типу буксира, і по суті означає перекидання. Перекидання в даному випадку викликано моментом, створеним між силами упору гвинтів і натягу троса.

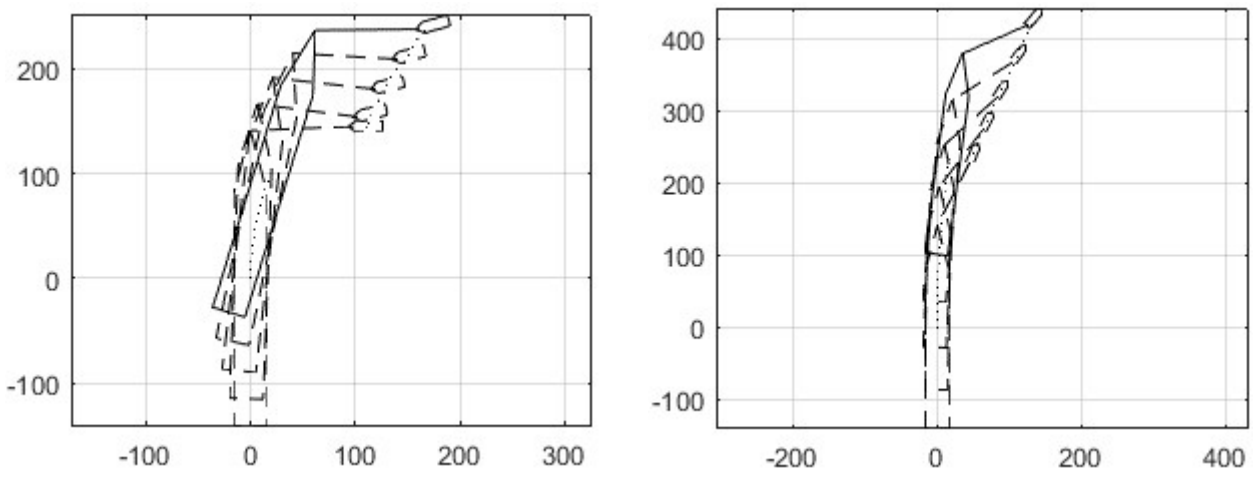


Рисунок 13 - Моделювання роботи системи буксир-судно в різних режимах: ліворуч – «bow-to-bow», швидкість – 2 вузла; праворуч «stern-to-bow», швидкість – 4 вузла

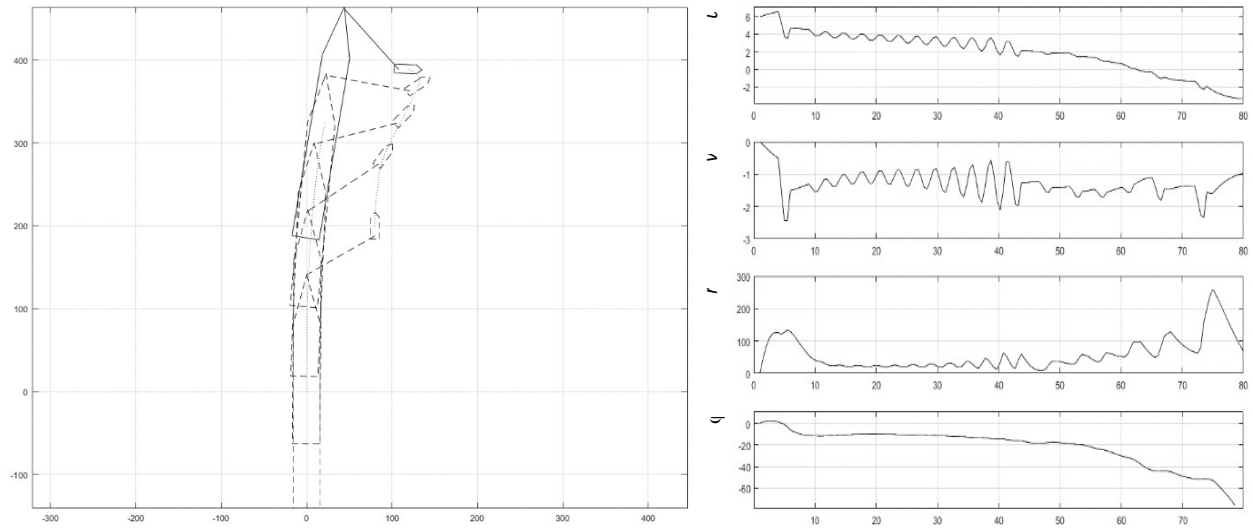


Рисунок 14 - Моделювання ситуації «гіртинг». Режим «stern-to-bow», швидкість – 6 вузлів

У розділі отримано модель маневрування сейсмічного судна з заданою кількістю сейсмічних кабелів (кос).

Двомірну модель динаміки коси, що описує рух нейтрально плавучого, нерозтяжного і гнучкого кабелю, що буксирується з постійною швидкістю в нестисливій рідині, можна представлено у вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial s} = -\frac{1}{2}\rho\pi d C_t V_{tr}\left|V_{tr}\right|, \tag{29}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = -\frac{\rho d C_n V_{nr}\left|V_{nr}\right|}{2T}. \tag{30}$$

Кінематичні співвідношення для цієї моделі наступні:

$$\frac{\partial V_n}{\partial s} + V_t \frac{\partial \theta}{\partial s} - \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \tag{31}$$

$$\frac{\partial V_t}{\partial s} + V_n \frac{\partial \theta}{\partial s} = 0 \tag{32}$$

де $V_{tr} = V_t - u$ та $V_{nr} = V_n - v$ нормальна і тангенціальна складові відносної швидкості кабелю відносно швидкостей води u та v по тих же осях.

Положення коси в картезіанській системі координат у кожен момент часу можна вивести з рівнянь:

$$\frac{\partial x}{\partial t}(s) = -ds \cdot sin\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}(s) + \theta(s,t)\right) + \frac{dx_c}{dt}, \tag{33}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t}(s) = -ds \cdot sin\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}(s) + \theta(s,t)\right) + \frac{dy_c}{dt}. \tag{34}$$

де dx_c and dy_c – декартові складові потоку води створюваного течією.

Також необхідно задати граничні умови. У передній частині швидкість кабелю співвідноситься зі швидкістю буксирного судна:

$$V_t(0,t) = V_X(t)\cos\theta(0,t) + V_Y(t)\sin\theta(0,t) \tag{35}$$

де V_X та V_Y – декартові складові швидкості судна в момент часу t.

Натяг на сейсмічному кабелі поступово послаблюється к кінцю. На вільному кінці коси в кінцевій точці він повинен дорівнювати нулю, проте кінцевий буй забезпечує строго позитивний натяг, значення якого лінійно масштабується до норми швидкості:

$$T(L_S,t) = 2.57^{-1} T_L \left(V_t^2(L_S,t) + V_n^2(L_S,t)\right)^{1/2} \tag{36}$$

На основі розроблених методів моделювання руху гнучкого кабелю запропоновано метод розрахунку маневру уникнення навігаційної небезпеки з урахування кута дрейфу судна та впливу течії на кабель.

Судно має зміститься в задану позицію з обмеженою поперечною швидкістю зміщення VC_V. В першу чергу оцінюється відхилення від лінії профілю ΔCOG (рис. 15):

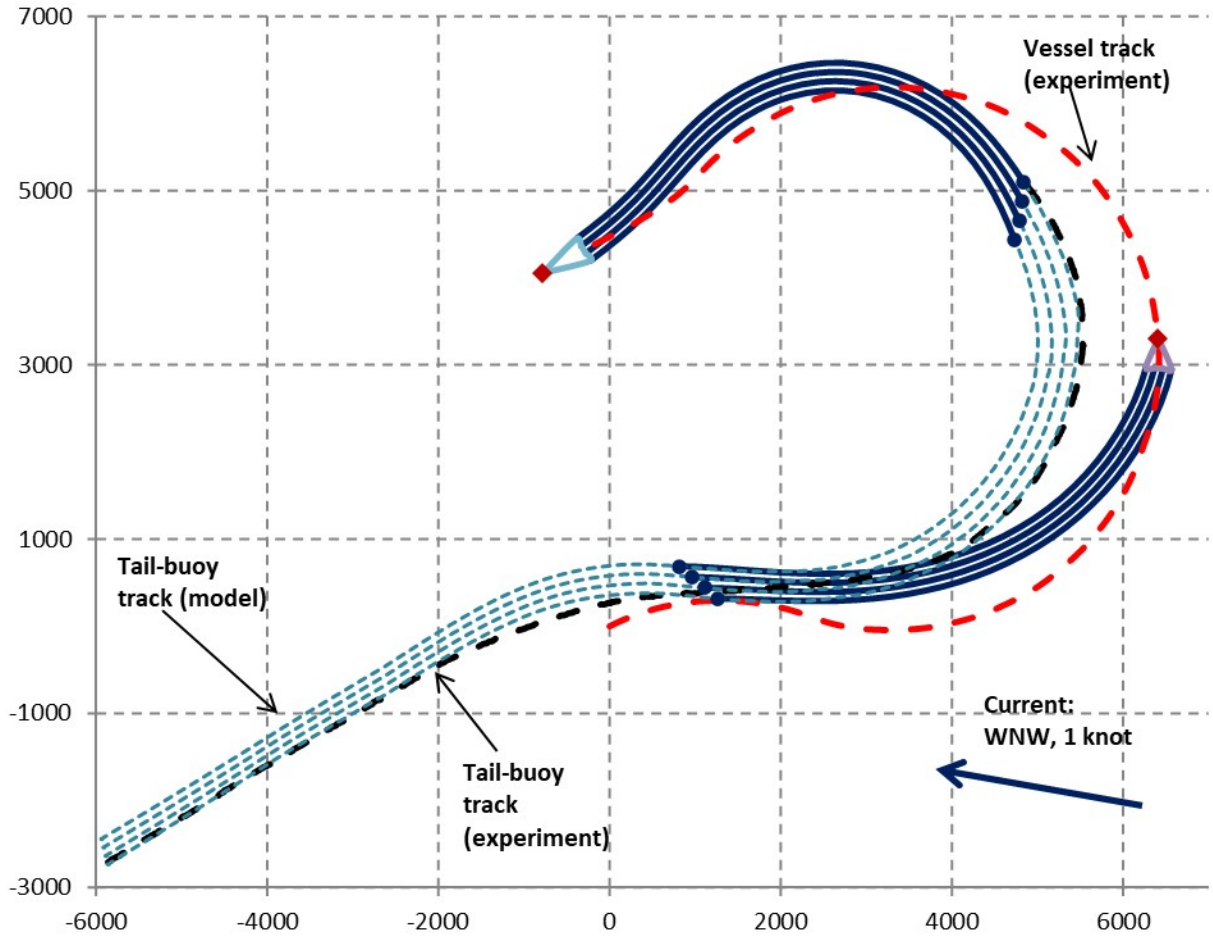


Рисунок 15 - Експериментальне підтвердження моделі судна сейсмічної розвідки

$$\Delta COG = \arcsin\frac{VC_V}{SOG} \tag{37}$$

Відстань, на якій судно зможе розійтися з навігаційною небезпекою DC_V^H, можна визначити:

$$DC_V^H = VC_V \cdot T_H - DC_H \tag{38}$$

Час на обхід небезпеки судном T_V і кінцевим буєм T_{TB} визначається:

$$T_V = DA_V^H / VA_V ; T_{TB} = \left(DA_V^H + L_S \cdot \cos\beta\right) / VA_V \tag{39}$$

Дистанція проходження кінцевого буя розраховується з урахуванням того, що кінцевий буй може мати власну поперечну швидкість VC_{TB} внаслідок зміни течії з часом.

$$DC_{TB}^H = L_S \cdot \sin\beta + DC_V^H + VC_{TB} \cdot T_{TB} \tag{40}$$

Судно чисто пройде небезпеку, якщо DC_V^H та DC_{TB}^H не дорівнюють нулю і

мають позитивне значення. З практичної точки зору для визначення мінімальної дистанції безпечного проходження небезпеки потрібно враховувати запас часу.

Якщо T_{TB} недостатньо для отримання бажаного відхилення, то профіль переривається і виконується аварійний маневр. Термін «аварійний маневр» в певному випадку означає поворот на 90° в сторону від небезпеки і, якщо можливо, в сторону дрейфу сейсмічного кабелю.

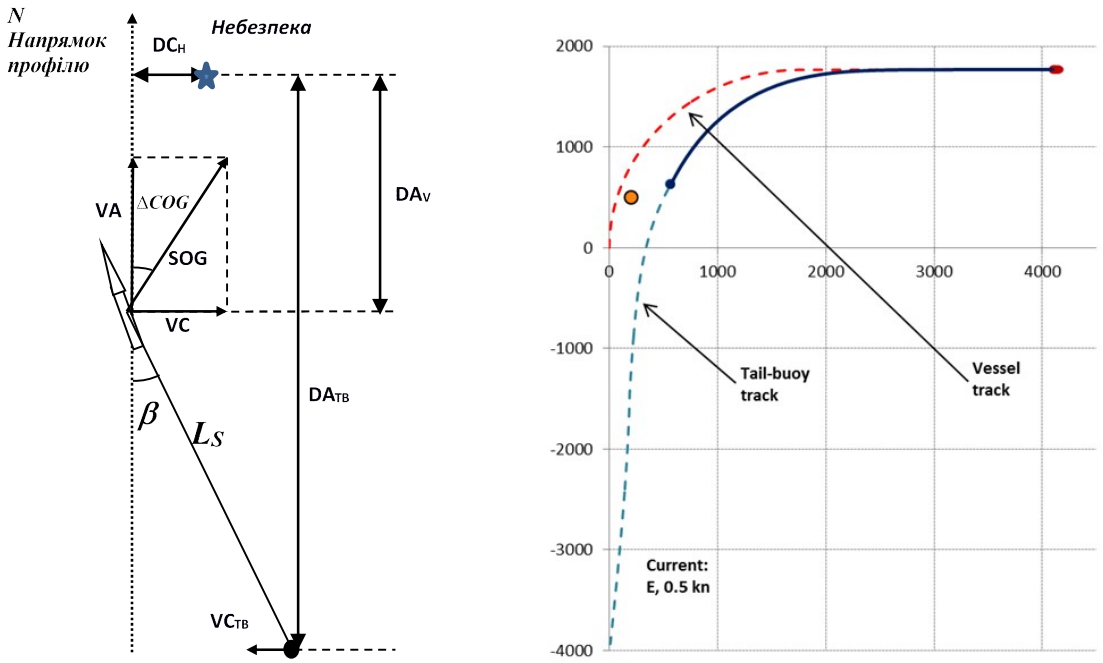


Рисунок 16 - Визначення зміщення (ліворуч); виконання аварійного маневру (праворуч)

На рис. 16 показано судно, що буксирує одну сейсмічну косу довжиною 4 км зі швидкістю 5 вузлів. Небезпека знаходиться на відстані 500 м на північ і 200 м на схід від судна. Швидкість течії 0,5 вузла на схід. Судно повернуло на 90° зі швидкістю 5°/хв і пройшло небезпеку на дистанції 250 м. Щоб уникнути небезпеки, задаючи зміщення, потрібно відхилиться від лінії шляху на 23°, що вимагає мінімальної VC_V 2 вузла, що в свою чергу неприйнятно для продовження руху за лінією профілю.

В розділі запропоновано алгоритм рішення зворотної задачі розходження суден на прикладі оцінки небезпеки перетину сейсмічної коси.

Даний алгоритм може бути інтегрований в стандартний варіант ЗАРП з метою отримання більш точної безперервної інформації про небезпеку контакту з обладнанням судна обмеженого в можливості маневрувати.

Розглянуто задачу: до сейсмічного судна а з відомим вектором руху $\bar{V}_A$ і довжиною коси l_{KC}, що має кут дрейфу відносно лінії профіля β, наближається судно B, що спостерігається за радіолокатором. Необхідно: визначити небезпеку зіткнення і небезпеку перетину коси.

Графічно ця задача вирішується, як показано на рис. 17.

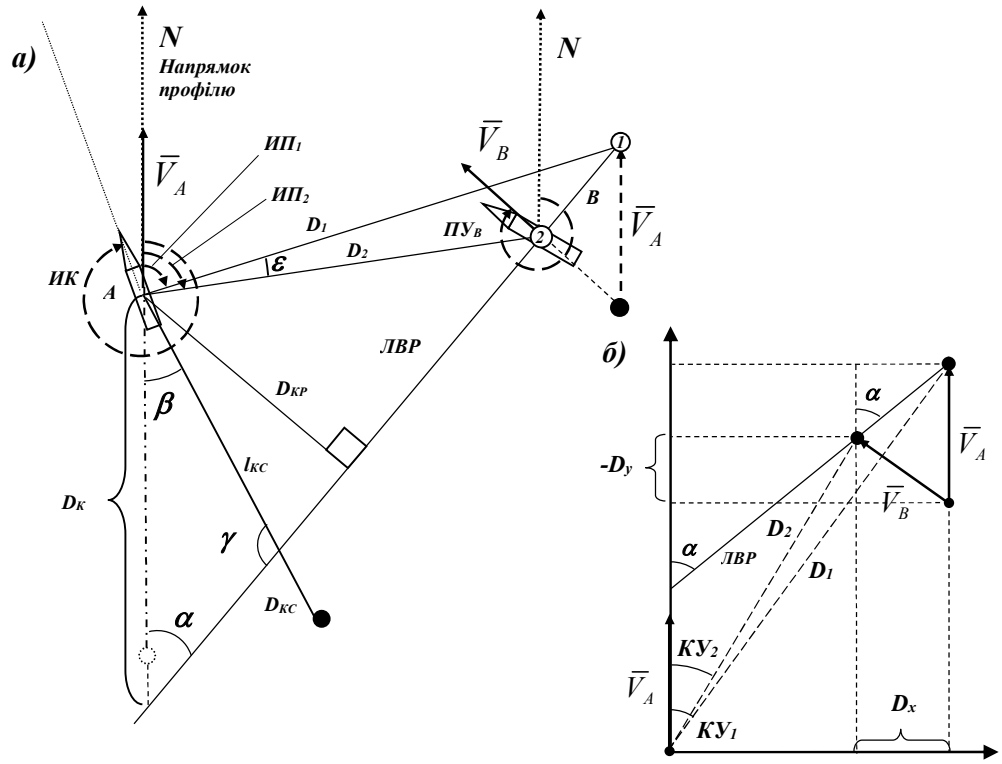


Рисунок 17 - Визначення параметрів цілі і зближення

Найкоротшу дистанцію розходження $D_{кр}$ можна визначити за формулою:

$$D_K = \frac{D_{KP}}{\sin\alpha} \cdot sign\big((ИП_2 - ИП_1 - 2ИК) \cdot \sin(ИП_2 - ИК)\big) \quad (41)$$

де ИК – істинний курс власного судна; *ПУ* - шляховий кут на заданій лінії профілю, *КУ* - відповідні курсові кути цілі визначаються за формулою $КУ = ИП - ПУ_A$, α – кут між ЛВР (лінією відносного руху) і лінією шляху судна, який розраховується за формулою:

$$\begin{cases} \alpha = \pi + К_О - ПУ_A, \text{при } \pi + К_О \geq ПУ_A; \\ \alpha = 2\pi + К_О - ПУ_A, \text{при } \pi + К_О < ПУ_A. \end{cases} \quad (42)$$

Функція $sign\big((ИП_2 - ИП_1 - 2ИК) \cdot \sin(ИП_2 - ИК)\big)$ в даному випадку визначає знак дистанції перетину, в залежності від тенденції зміни пеленга і борту, з якого знаходиться судно-ціль: «+» – по кормі, «-» – по носу.

Кут відхилення коси від лінії профілю розраховується за формулою:

$$\beta = К_{ПР} - П_{КБ};\ \beta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \quad (43)$$

де $К_{ПР}$ – курс на лінії профілю, $П_{КБ}$ – істинний пеленг з судна на кінцевий буй.

Застосувавши теорему синусів отримаємо:

$$\frac{l_{KC} + D_{KC}}{\sin\alpha} = \frac{D_K}{\sin\gamma}, \tag{44}$$

$$\gamma = \pi - (\alpha + \beta). \tag{45}$$

Після перетворення отримаємо:

$$D_{KC} = \frac{D_K}{sin(\alpha + \beta)} \cdot sin\,\alpha - l_{KC} \tag{46}$$

Водночас, якщо $D_{KC} < 0$ и $| D_{KC} | \leq l_{KC}$ – існує небезпека перетину коси; якщо $| D_{KC} | > l_{KC}$ – ціль не перетинає косу;

Шостий розділ присвячено методам оцінки навігаційної безпеки. У розділі визначаються основні характеристики та критерії небезпеки, та приводяться алгоритми їх розрахунку.

Оцінка небезпеки зіткнення чи навалу. Аналіз розслідувань зіткнень показує, що у більшості випадків аварії відбувалися або в результаті неправильного рішення судноводія, або через недостатню оцінку ситуації. Це, в свою чергу, означає, що судноводії не усвідомлюють настання ситуації *маневру останнього моменту* (МОМ). «Останній момент» практично характеризує поріг часу, після проходження котрого зіткнення відбудеться незалежно від вживаних дій.

У правилах запобігання зіткненню МППЗС наведено термін close quarters – *небезпечне зближення.* Однак офіційне визначення цього терміну в публікаціях ІМО не наводиться.

Буде логічно зробити висновок, що МОМ виконується в ситуації небезпечного зближення суден, при цьому *останній момент* – момент часу, після котрого зіткнення відбудеться незалежно від вживаних дій.

Звідси, *маневр останнього моменту (МОМ) – маневр, що призводить до розходження суден на найкоротшій дистанції, яка прагне до нуля.*

МОМ можна розділити на два види:

- *одиночний* – маневр, що здійснюється одним судном, за умови, що інше зберігає курс і швидкість;
- *взаємний* – маневр, що здійснюється обома суднами.

Схема виконання МОМ показана на рис. 18.

Для програмної реалізації алгоритму оцінки небезпеки зіткнення з урахуванням розмірів судна справедливо буде наступне:

Лема 1: *небезпека зіткнення* існує, якщо пеленг β на інше судно з плином часу не змінюється, при швидкості зближення суден $V_{COLLISION}$ не рівній нулю.

Лема 2: *зіткнення* суден А і В, визначених відповідними множинами точок

настає, коли A ∩ B.

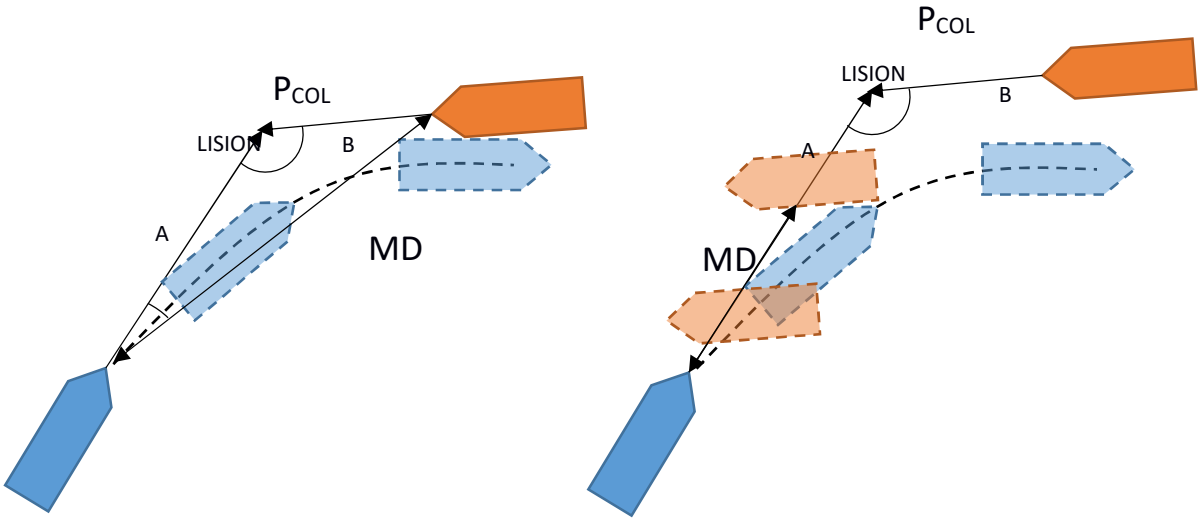


Рисунок 18 - Маневр останнього моменту. Ліворуч – істинний рух. Праворуч – визначення MDTCP шляхом видалення судна B за курсом судна A.

Якщо судна маневрують, тоді *зіткнення* суден A і B, визначених відповідними множинами точок настає, коли геометричні множини точок їх траєкторій AA ⊃ A і BB ⊃ B перетинаються: AA ∩ BB.

Запропоновано класифікацію маневрів останнього моменту згідно до правил МППЗС (рис. 19).

Для того щоб врахувати інерційні характеристики судна запропоновано використовувати поняття мінімальної відстань між суднами MDTC (*minimum distance to collision*) та мінімальної дистанції до точки зіткнення MDTCP (*minimum distance to a collision point*).

MDTC є функцією швидкості взаємного зближення суден $V_{COLLISION}$, кута перетину курсів α, масиву параметрів маневру M і розмірів суден:

$$\mathrm{MDTC} = f(V_{\mathrm{COLLISION}},\alpha,\mathrm{M},\mathrm{BB},\mathrm{AA}) \qquad (47)$$

Масив M характеризує параметри управління судном в найзагальнішому випадку – кут перекладки стерна δ і режим ходу n.

Якщо α = 0 – курси суден співпадають, якщо α = 180 – курси суден протилежні.

Такий підхід не дозволяє отримати однозначного вирішення задачі, так як при одному значенні MDTC, але різних швидкостях зближення суден, небезпеки зіткнення може не бути.

MDTCP – мінімальна дистанція до розрахункової точки зіткнення, на якій планований маневр буде ефективним; геометрично визначається як відстань

між найближчими одна до одної точками множин A і B.

Теорема. Якщо небезпека зіткнення існує, і маневр виконується одним судном, для одного значення *мінімальної дистанції до точки зіткнення* MDTCP(α,M,B,AA) існує множина MDTC(V_A, V_B).

У разі *одиночного* маневру судно-ціль зберігає свої курс та швидкість. Таким чином, буде справедливим твердження, що, незалежно від маневру судна A, судно B опиниться в прогнозованій точці зіткнення $P_{COLLISION}$ з курсом ψ_B.

Для того щоб знайти MDTCP, завдання вирішується інверсним способом від моменту зіткнення (рис. 19). Судно B під кутом α розташовується у початковій позиції судна A, а потім віддаляється за курсом судна A з кроком α до тих пір, поки множина точок AA не перестане перетинатися з B. Дистанція між початковою позицією судна A і позицією судна B, в якій $B \notin AA$ визначається як MDTCP.

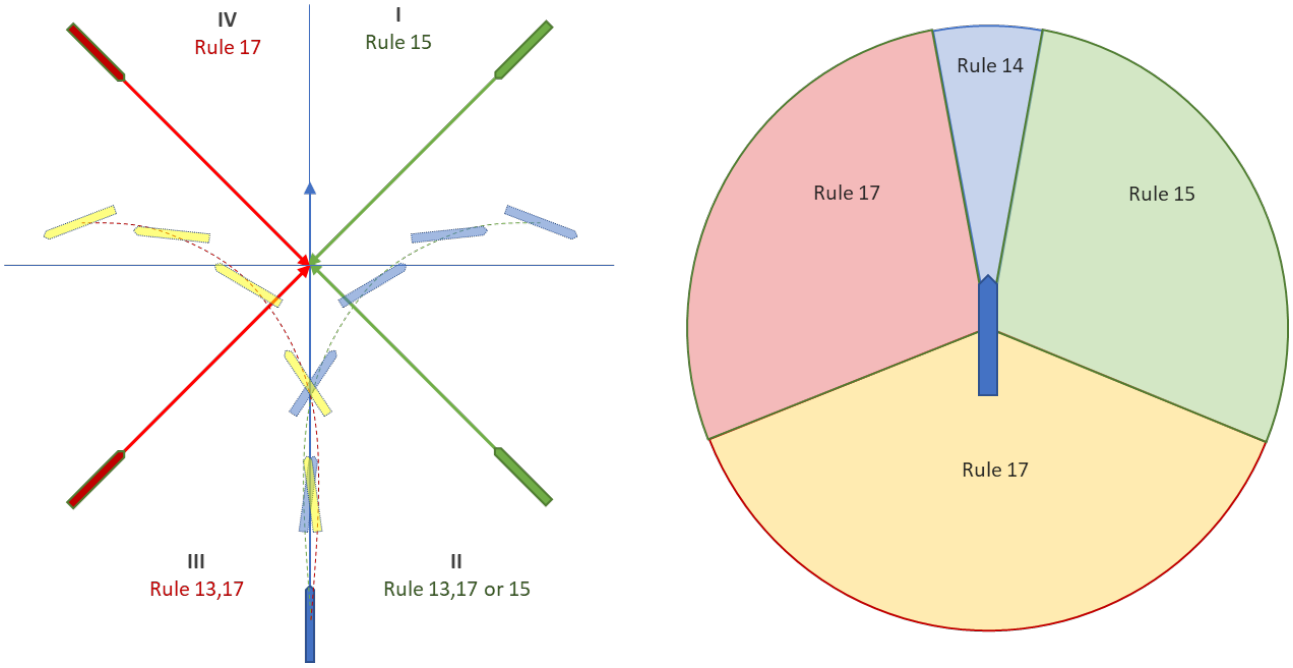


Рисунок 19 - Маневр останнього моменту у перспективі правил МППЗС

У даному випадку при вирішенні задачі немає необхідності враховувати швидкість руху суден:

$$\mathrm{MDTCP} = f(\alpha,\mathrm{M},\mathrm{B},\mathrm{AA}). \tag{48}$$

Дві досліджувані дистанції пов'язані між собою як:

$$\mathrm{MDTC} = \mathrm{MDTCP}\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}. \tag{49}$$

Умова зіткнення суден передбачає, що істинні вектори руху суден

зімкнуться в одній точці $P_{COLLISION}$. Звідси, швидкість взаємного зближення визначається за теоремою косинусів:

$$V_{COLLISION} = \sqrt{V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos\alpha}. \quad (50)$$

Оскільки курсовий кут β = const, незалежно від відстані між суднами:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{V_B \sin\alpha}{V_{COLLISION}}\right). \quad (51)$$

Звідси, для одного значення MDTCP існує множина MDTC(V_A, V_B).

Алгоритм програми визначення MDTCP наведено на рис. 20.

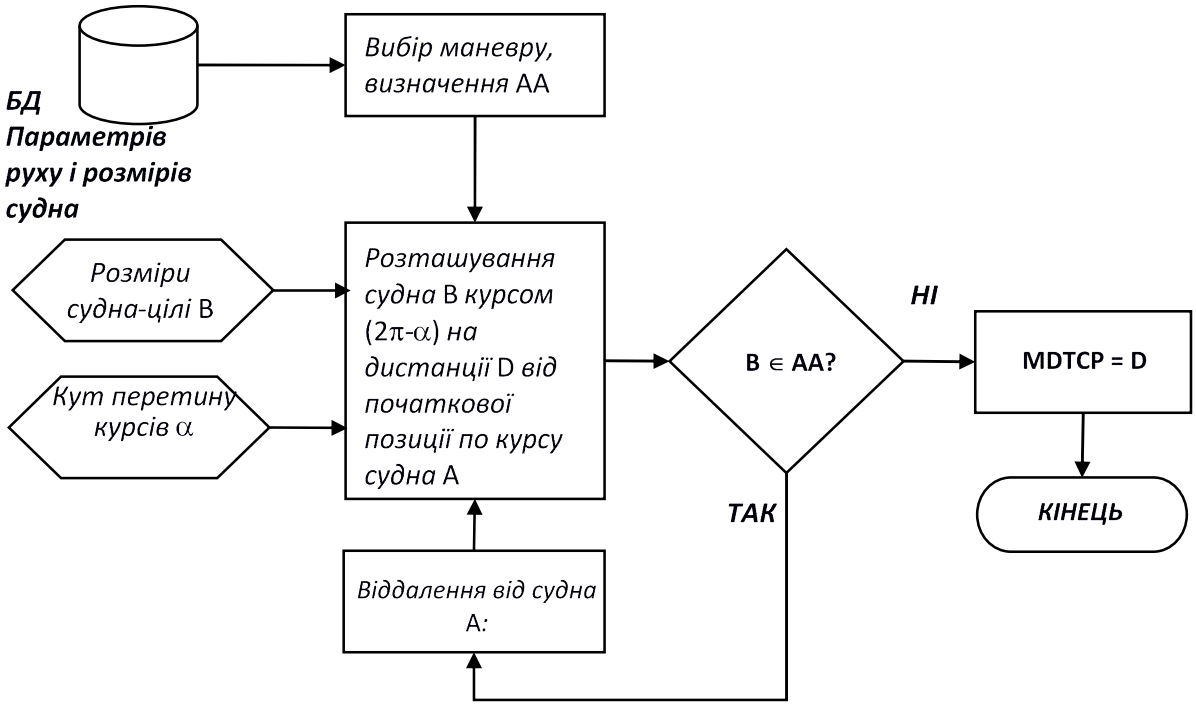


Рисунок 20 - Блок-схема алгоритму програми визначення MDTCP

На рис. 21 відображені результати розрахунку мінімальної дистанції до прогнозованої зони найкоротшого зближення для суден-цілей різних розмірів. Невиконання аварійного маневру в межах цієї дистанції призведе до зіткнення суден. Водночас крива, що описує MDTCP, має більше стиснення відносно центру на зустрічних та попутних курсових кутах.

Оцінка небезпеки посадки на мілину.

Лема. *Небезпека посадки на мілину* існує, якщо судно має ненульову швидкість та прямує до зони де динамічна осадка судна може дорівнювати або бути більшою ніж глибина.

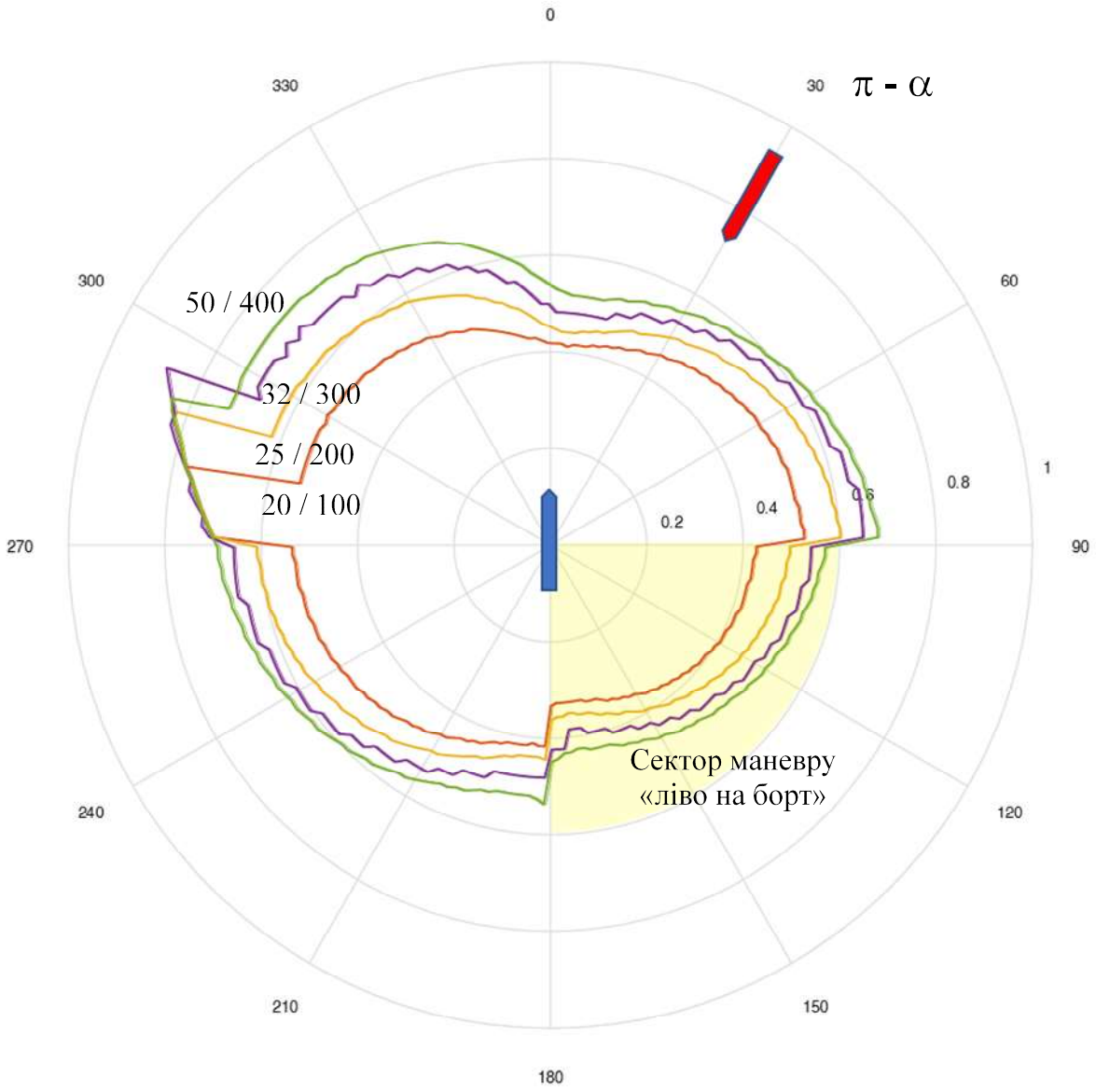


Рисунок 21 - Мінімальна дистанція (у м. милях) до прогнозованої зони найкоротшого зближення з суднами-цілями різних розмірів (B / L, м)

Звідси *безпечна глибина* – це глибина, понад якою, з урахуванням похибок вимірювань, неточності картографічною інформації та динамічних факторів (вертикальна та кильова хитавиця, просідання тощо) судно з заданою вірогідністю пройде без контакту з дном.

$$D_{safe} = T_{static} + UKC + \Delta_{squat} + \Delta_{ZOC} + \Delta_{\rho} + \Delta_{\varphi} + \Delta_{\theta} - \Delta_{tide} \qquad (52)$$

де D_{Safe} – безпечна глибина, UKC – запас під килем, T_{static} – осадка судна в стані покою, Δ_{squat} – просідання судна на мілководді, Δ_{ZOC} – поправка на неточність картографічної інформації, Δ_{ρ} - поправка на щільність води, Δ_{φ} - поправка на кильову та вертикальну хитавицю, Δ_{θ} - поправка на крін, Δ_{tide} – рівень приливу.

При цьому запропоновано розділяти проектну та операційну оцінку

небезпеки посадки на мілину.

Проектна оцінка - визначення ймовірності посадки судна на мілину на заданій ділянці з відомими параметрами, з метою визначення проектних розмірів каналу або судів, що проходять по заданому каналу.

Операційна оцінка - визначення параметрів безпеки (зокрема, безпечної глибини) при наявності обмеженого обсягу інформації по заданій ділянці, а також невизначеності в стані погодних умов (вітер, хвилювання, протягом).

В загальному вигляді елементи функції (52) можуть бути отримані наступним образом:

$$\Delta_{squat} = f(\mathbb{S}, \mathbb{C}, U_w), \tag{53}$$

$$\Delta_{ZOC} = f(ZOC, h), \tag{54}$$

$$\Delta_{\rho} = T_{static}\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right), \tag{55}$$

$$\Delta_{\varphi} = f(\mathbb{S}, \varphi_{max}), \tag{56}$$

$$\Delta_{\theta} = f(\mathbb{S}, \theta_{max}, w_{max}), \tag{57}$$

$$\Delta_{tide} = f(\mathbb{G}, t), \tag{58}$$

де $\mathbb{S}$ – множина параметрів, описуючих корпус судна; $\mathbb{C}$ - множина параметрів, описуючих конфігурацію канала чи мілководдя; U_w – швидкість судна відносно до води; ρ_n – щільність води; φ_{max} – максимальне розрахункове значення бортового нахилу судна; w_{max} – максимальне значення вертикальних переміщень судна; θ_{max} – максимальне розрахункове значення диференту судна; $\mathbb{G}$ – множина, описуюча географічну локацію; t – заданий час.

Важливо відмітити, що θ_{max} та w_{max} визначаються в залежності від висоти хвилі, спектру хвилювання та відповідних амплітудно-частотних характеристик. З іншого боку φ_{max} складається з трьох компонентів:

$$\varphi_{max} = \varphi_{turn} + \varphi_{wind} + \varphi_{RAO}, \tag{59}$$

де φ_{turn} – крін, який виникає під час повороту судна та може визначатися за допомогою рівняння (15); φ_{wind} - крін, який виникає під впливом вітру; φ_{RAO} – амплітуда бортових коливань, яка визначається залежно від спектральних характеристик хвилювання у районі, який розглядається.

Для компенсації невизначеностей запропоновано використання політики запасу під кілем (UKC policy), що добре погоджується з прийнятою в індустрії практикою. На основі аналізу існуючих політик судноплавних компаній, індустріальних рекомендацій та експертного аналізу було запропоновано UKC політику наведено у таблиці 1, що відрізняється від існуючих урахуванням точності картографічної інформації.

Таблиця 1. Визначення запасу глибини під кілем (UKC) з урахуванням точності карти (CATZOC)

Район	Відкритий D	Відкритий A	Прибрежний D	Прибрежний A	Канал	Причал
Відстань	>12 миль		<12 миль		Min	**Min**
ZOC	D, U	A1-C	D, U	A1-C	**0.5 m**	**0.3 m**
UKC	$0.5 \cdot T_{static}$	$0.2 \cdot T_{static}$	$0.2 \cdot T_{static}$	$0.1 \cdot T_{static}$	0.015·B	0.015·B

ZOC – Zone of Confidence, характеристика точності картографічної інформації, яка може приймати шість значень: A1, A2, B, C, D, U.

A – accurate, район у якому поправку на точність картографічної інформації визначено.

D – doubtful, район у якому поправку на точність картографічної інформації не визначено.

На базі проведених досліджень було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє призвести розрахунок та оцінку безпечної глибини на заданих відрізках маршруту судна (рис. 22).

PASSAGE PLAN - UKC CALCULATION

Vessel **Dream** From **Miami** To **Norfolk** WP + WP - Rows 1, 4 - 10 shall be edited by User

ROUTE DATA

No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	ETA (Date & Time)	08 May - 12:05	08 May - 12:07	08 May - 12:11	08 May - 12:16	08 May - 12:19	08 May - 12:31	09 May - 20:55	09 May - 23:50	10 May - 03:31	10 May - 05:50	10 May - 06:53	10 May - 09:00	10 May - 09:04
	Waypoint / Position / Leg	**WP 00**	**WP 01**	**WP 02**	**WP 03**	**WP 04**	**WP 05**	**WP 10**	**WP 11**	**WP 12**	**WP 13**	**WP 15**	**WP 22**	**WP 23**
1	UKC area	Pilotage	Pilotage	Pilotage	Pilotage	Pilotage	Pilotage	Deep Sea D	Deep Sea D	Deep Sea D	Deep Sea A	Pilotage	Pilotage	Pilotage
2	Maximum Planned Speed	0.0 Knots	5.0 Knots	5.0 Knots	5.0 Knots	10.0 Knots	10.0 Knots	20.0 Knots	20.0 Knots	20.0 Knots	20.0 Knots	10.0 Knots	12.0 Knots	6.0 Knots
3	Shallowest charted depth within XTE corridor	15.1 m	15.1 m	15.1 m	15.2 m	14.6 m	14.6 m	411.0 m	1944.0 m	20.1 m	18.2 m	12.8 m	14.9 m	14.9 m
4	Ship's maximum static draught	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m	10.50 m
5	CATZOC Category	B	B	B	B	B	C	A1	A1	A1	A1	B	B	D
6	Confined Waters Width at the narrowest point	182.0 m	182.0 m	158.0 m	158.0 m	162.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m
7	Predicted Height of Tide ***(window)***	0.70 m	0.70 m	0.70 m	0.70 m	0.70 m	0.00 m	0.00 m	0.60 m	0.60 m	0.60 m	0.60 m	0.60 m	0.60 m
8	Vessel's Expected Heel	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	5.0 degree	5.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree	2.0 degree
9	Density of Passage Sea Water	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3	1.025 t/m3
10	Significant wave height	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	2.50 m	2.50 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m
CORRECTIONS														
11	Area (Open / Confined Waters)	Confined Water	Confined Water	Confined Water	Confined Water	Confined Water	Shallow Water	Deep Water	Deep Water	Shallow Water	Shallow Water	Shallow Water	Shallow Water	Shallow Water
12	Allowance for accuracy of hydrographic data (CATZOC)	1.30 m	1.30 m	1.30 m	1.30 m	1.29 m	2.73 m	4.61 m	19.94 m	0.70 m	0.68 m	1.26 m	1.30 m	4.49 m
13	Draught increase due to heel	0.84 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m	2.11 m	2.11 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m	0.84 m
14	Sinkage due to change of density of Sea Water	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m
15	Squat at Maximum Planned Speed (**Simple**)	0.00 m	0.35 m	0.35 m	0.35 m	1.40 m	0.70 m	0.00 m	0.00 m	2.79 m	2.79 m	0.70 m	1.00 m	0.25 m
16	Squat at Maximum Planned Speed (**Full**)	0.00 m	0.25 m	0.29 m	0.28 m	1.22 m	0.61 m	0.00 m	0.00 m	1.78 m	1.91 m	0.60 m	0.78 m	0.22 m
17	Draught increase due to pitch / heave	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	1.25 m	1.25 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m
18	Required remaning clearance (RUKC)	1.05 m	1.05 m	1.05 m	1.05 m	1.05 m	1.05 m	5.25 m	5.25 m	5.25 m	2.10 m	1.05 m	1.05 m	1.05 m
19	Dynamic Under Keel Clearance	**3.16 m**	**2.81 m**	**2.81 m**	**2.91 m**	**1.27 m**	**-2.69 m**	**392.53 m**	**1913.32 m**	**5.87 m**	**3.98 m**	**0.10 m**	**1.86 m**	**-0.58 m**
20	**Acceptable?**	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	YES	YES	NO	YES	NO
ECDIS SETTINGS														
21	**ECDIS 'Safety Depth' & 'Safety Contour'**	**13.0 m**	**13.4 m**	**13.4 m**	**13.4 m**	**14.4 m**	**18.4 m**	**23.8 m**	**30.0 m**	**19.5 m**	**16.4 m**	**13.8 m**	**14.1 m**	**16.6 m**
22	Deep Contour (2 x Draught)	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m	21.00 m
23	ECDIS 'Shallow Contour'													

Рисунок 22 - Знімок екрану з програми «UKC calculation tool»

У **сьомому розділі** сформульовано принципи оцінки навігаційної безпеки на основі комбінації кількісних та якісних характеристик ризику навігаційного інциденту. Уточнено чи сформульовано ряд визначень, на базі яких формується поняття навігаційної безпеки, а саме:

Безпека – стан у якому ризик втрат знижено до мінімально практично-обґрунтованого рівню.

Ефективність - співвідношення між досягнутим результатом і використаними ресурсами (ISO 9000: 2015).

Витрати і заходи спрямовані на гарантування безпеки, повинні бути *настільки малими наскільки це практично обґрунтовано* (ALARP).

Небезпека – це стан дія, чи їх комбінація, які можуть привести до втрат (збитку).

Збитків може бути завдано: людському здоров'ю, навколишньому природному середовищу, майну, репутації (особи, організації, країни тощо).

Ризик – комбінація імовірності проявлення небезпеки та потенційних наслідків від її проявлення.

Інцидент - це незапланована послідовність подій та / або умов, які призводять до збитків або могли спричинити їх.

Функціонально ризик прийнято виражати, як добуток імовірності P та тяжкості S:

$$R = P \times S. \tag{60}$$

Операційна оцінка ризику – оцінка імовірності та ступеня наслідків по кількісним показникам у відсутності достатньої вибірки статистичних даних.

Далі розглядаються параметри, які запропоновано використовувати під час операційної оцінки ризику.

Одним з визначальних чинників *ступеня наслідків (S)* при зіткненні або посадки на мілину є швидкість зближення (іншими факторами є кут перетину курсів, маса та матеріал).

$$S = f(U, \nabla, \alpha, \gamma), \tag{61}$$

де U – швидкість судна; ∇ – маса судна; α – кут очікуваного контакту; γ – характеристика контактуючих матеріалів.

Спрощено тяжкість наслідків запропоновано оцінювати як:

$$S = U_c^2 \tag{62}$$

де U_c – швидкість зближення з небезпекою або взаємного зближення суден.

Або з урахуванням кута очікуваного контакту:

$$S = U_c^2 \times (1 + sin(\alpha)). \quad (63)$$

Імовірність (P) залежить від ряду чинників, зокрема від: часу і дистанції найкоротшого зближення, дистанції між суднами, розмірів суден і їх маневреності, погодних умов.

Визначальним фактором, при цьому, є час найкоротшого зближення (*TCPA*). Таким чином, якщо *CPA (дистанція найкоротшого зближення)* = 0, у спрощеному вигляді імовірність можна представити пропорційною до *TCPA*:

$$P = \frac{1}{TCPA}. \quad (64)$$

Таблиця 2. Матриця ризиків розрахована спрощеним методом

Ризик		**TCPA, годин**			
		1	0.75	0.5	0.25
U_c, вузли	1	1	1.33	2	4
	5	25	33	50	100
	10	100	133	200	400
	20	400	533	800	1600

0 – 99 – низький рівень ризику; 100 – 199 – середній рівень ризику; 200 – 499; >500 - неприйнятний рівень ризику.

Звідси ризик:

$$R = P \times S = \frac{U_c^2 \times (1+sin(\alpha))}{TCPA}. \quad (65)$$

У таблиці 2 представлено матрицю ризиків розраховану за рівнянням (65), з кутом очікуваного контакту $\alpha = 0°$.

Рівні ризику можуть бути отримані методом експертної оцінки, виходячи з потенційних втрат. З іншого боку, щоб отримати розрахунковий ступень наслідків, запропоновано «енергетичний» підхід для визначення безпечної швидкості контакту U_s через абсорбовану енергію E_a, яка характеризує відсутність пошкодження конструкції корпусу при контакті:

$$U_S = \sqrt{\frac{2E_a}{\nabla}} \quad (66)$$

Тобто виконується умова:

$$E_K < E_a, \quad (67)$$

$$E_K = \frac{1}{2}\nabla U_c^2 \tag{68}$$

Звідси нормоване значення швидкості контакту може буте визначено наступним чином:

$$U_N = \frac{U_c}{U_S(E_\alpha)} \tag{69}$$

Окрім часу найкоротшого зближення (*TCPA*) на імовірність контакту з об'єктом впливають дистанція найкоротшого зближення (*CPA*) та спроможність судна виконати маневр за наданий час (*TCPA*), що у свою чергу може бути виражено відношенням дистанції до точки контакту (*DTCP*) до мінімальної дистанції до розрахункової точки контакту (*MDTCP*), яка визначається рівнянням *(48)*:

$$DTCP_N = \frac{DTCP}{MDTCP(\alpha, \mathbb{S}, \mathbb{S}_t)} \tag{70}$$

Нормовані значення часу найкоротшого зближення (*TCPA*) та дистанції найкоротшого зближення (*CPA*) можуть бути отримані наступним образом:

$$TCPA_N = \frac{TCPA}{TCPA_S(U, U_c)} \tag{71}$$

$$CPA_N = \frac{CPA}{CPA_S(\alpha, \mathbb{S})} \tag{72}$$

де $TCPA_S$ – час, який визначено як безпечний виходячи з часу потрібного на виконання маневру у заданому режимі управління; CPA_S – дистанція, яку визначено як безпечну.

Для визначення мінімально допустимої дистанції розходження в обмежених водах запропонована наступна формула:

$$CPA_{min} = (SF_L \times L \times \sin(\alpha) + SF_B \times B \times |\cos(\alpha)|)/L \tag{73}$$

де CPA_{min} – мінімально допустима дистанція розходження; L – довжина судна; B – ширина судна; α – кут перетину курсів, °; SF_L – поздовжній коефіцієнт безпеки; SF_B – поперечний коефіцієнт безпеки;

Вибір змінної CPA обумовлений тим, що при зближенні у вузькості на протилежних або попутних курсах досить важко і через обмеження

навігаційного характеру не завжди практично можливо підтримувати велику дистанцію між суднами. З іншого боку, якщо акваторія дозволяє суднам зближуватися під кутами близькими до перпендикулярних, судноводії повинні підтримувати певний запас по дистанції, щоб залишити місце для маневру.

Приклад розрахованої таким чином змінної CPA показаний на рис. 23.

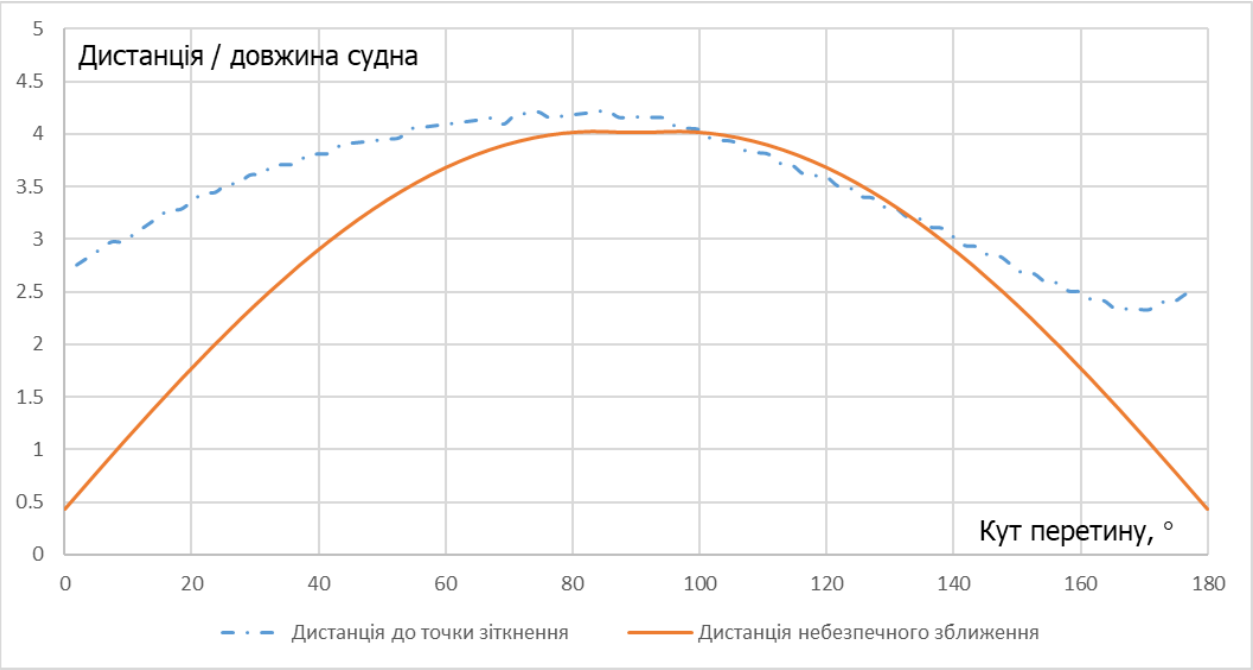
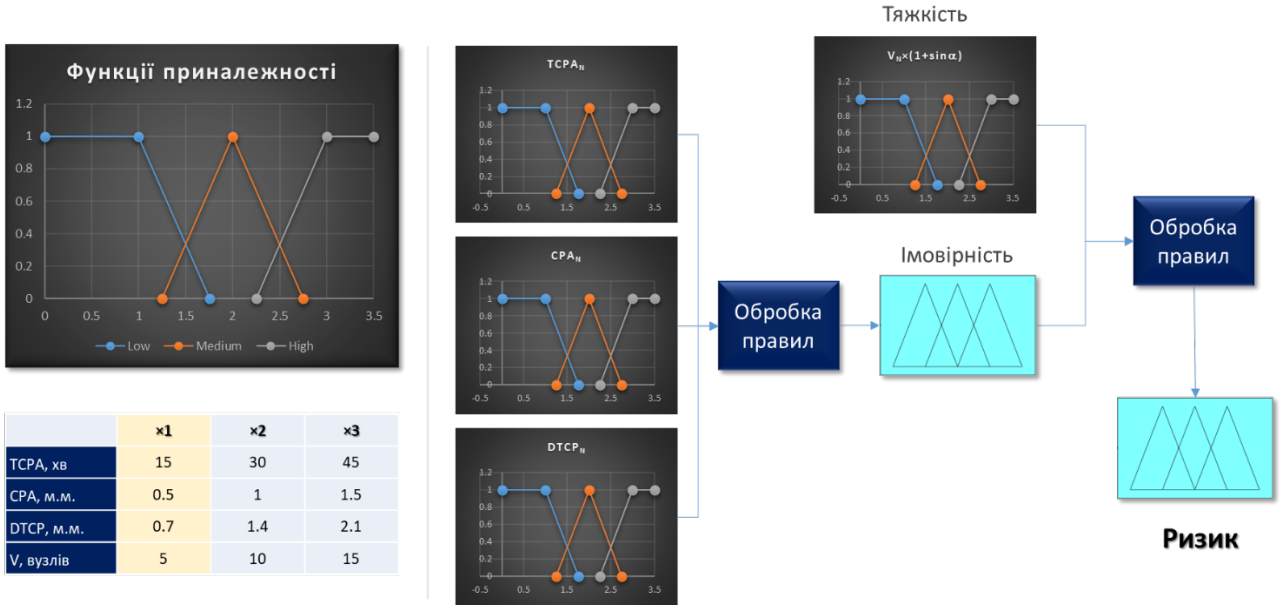


Рисунок 23 - Дистанція останнього маневру для розходження поворотом вправо і дистанція небезпечного зближення в залежності від кута перетину курсів для судна довжиною 282 м, шириною 32,2 м з коефіцієнтами безпеки $SF_L = SF_B = 4$.

Таким чином імовірність контакту (зіткнення чи посадки на мілину) визначається як

$$P_c = \frac{1}{TCPA_N \times \mathrm{CPA}_N \times DTCP_N} \tag{74}$$

Для того щоб реалізувати формалізований перехід від кількісної до зрозумілою оператору якісну оцінку, запропоновано використати методи нечіткої логіки. На основі попередніх розрахунків та експертною оцінки формуються функції приналежності для *CPA*, *TCPA*, *DTCP* та *S* (рис. 24).



	×1	×2	×3
TCPA, хв	15	30	45
CPA, м.м.	0.5	1	1.5
DTCP, м.м.	0.7	1.4	2.1
V, вузлів	5	10	15

Рисунок 24 - Загальний вид нечітко-логічної системи оцінки ризику зіткнення чи посадки на мілину

Далі формуються таблиці правил для послідовної оцінки імовірності та ризику (рис. 25).

TCPA	CPA	DTCP	LIKELYHOOD
LOW	LOW	LOW	HIGH
LOW	LOW	MEDIUM	HIGH
LOW	LOW	HIGH	HIGH
LOW	MEDIUM	LOW	HIGH
LOW	MEDIUM	MEDIUM	HIGH
LOW	MEDIUM	HIGH	MEDIUM
LOW	HIGH	LOW	MEDIUM
LOW	HIGH	MEDIUM	MEDIUM
LOW	HIGH	HIGH	LOW
MEDIUM	LOW	LOW	HIGH
MEDIUM	LOW	MEDIUM	HIGH
MEDIUM	LOW	HIGH	HIGH
MEDIUM	MEDIUM	LOW	MEDIUM
MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM
MEDIUM	MEDIUM	HIGH	MEDIUM
MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM
MEDIUM	HIGH	MEDIUM	LOW
MEDIUM	HIGH	HIGH	LOW
HIGH	LOW	LOW	HIGH
HIGH	LOW	MEDIUM	HIGH
HIGH	LOW	HIGH	HIGH
HIGH	MEDIUM	LOW	MEDIUM
HIGH	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM
HIGH	MEDIUM	HIGH	MEDIUM
HIGH	HIGH	LOW	LOW
HIGH	HIGH	MEDIUM	LOW
HIGH	HIGH	HIGH	LOW

LIKELIHOOD	SEVERITY: LOW	SEVERITY: MEDIUM	SEVERITY: HIGH
LOW	LOW	LOW	MEDIUM
MEDIUM	LOW	MEDIUM	HIGH
HIGH	MEDIUM	HIGH	HIGH

Рисунок 25 - Приклад набору правил для нечітко-логічної систем оцінки ризику зіткнення чи посадки на мілину

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпечної експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих, методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач. За результатами дослідження зроблені наступні основні висновки.

1. Проведено аналіз наукових досліджень та проблем морського транспорту направлений на висвітлення основних факторів які впливають на безпеку судноплавства в умовах новітніх концепцій та стратегії розвитку судноплавної галузі.

2. На прикладі організації та планування операцій судна визначені, засновані із запиту практики, основні проблеми і задачі гарантування безпеки та підвищення ефективності роботи морського транспорту.

3. Доведено, що подальший розвиток ефективного, з позицій комерційної експлуатації, функціонування морських і річкових суден, пов'язаний з гарантуванням безпеки мореплавства, яка досяжна тільки впровадженням інтегрованих методів її кількісного оцінювання.

4. Показано, що існуючи способи оцінки ризику слабо обґрунтовані і неефективні у режимі операційної підтримки рішень. Встановлено, що вдосконалення існуючих способів оцінки безпеки можливо за рахунок впровадження кількісної оцінки ризиків на основі операційної інформації, що надходить від вимірювальної системи судна, автоматичної ідентифікаційної системи інших суден і зовнішніх систем управління рухом.

5. На основі аналізу аварійності морського транспорту та моделювання інцидентів на симуляторах навігаційного містку під час тренування судноводіїв запропоновано класифікацію помилок судноводіїв за результатами небезпечних наближень, зіткнень та посадок суден на мілину, яка відрізняється розробленою структуризацією помилок, що дозволяє проводити декомпозицію причин морських інцидентів.

6. Визначені основні методологічні основи і принципи аналізу та синтезу процедур і процесів управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач (теоретичні засади, головні принципи і методи), визначена "технологія" наукового дослідження.

7. Встановлено, що для отримання адекватної моделі руху судна для використання у бортовій системі підтримки рішень необхідно уточнювати існуючу модель на основі малої вибірки даних та запропоновано методику верифікації математичної моделі плаского руху судна, яка за рахунок форми запису цільових функцій, дозволяє уточнювати математичні моделі руху суден при застосуванні обмеженої вибірки даних морських випробувань.

8. Вдосконалено метод розрахунку динамічної остійності судна у реальному часі, який дозволяє розраховувати рух частково чи повністю занурюваного судна, що дозволяє розроблювати моделі шлюпок свобідного

падіння та інших подібних об’єктів для використання на симуляторах.

9. Запропоновано використання двоканальної системи стабілізації курсу судна, побудованої на основі штучних нейронних мереж. Встановлено, що пропонована система ефективно компенсує дію вітро-хвильових збурень та зменшує витрати пального у режимах стабілізації курсу. Досліджені процеси управління маневруванням судна на основі систем автоматичного проходження вздовж траєкторії. Проведено порівняння ефективності запропонованих алгоритмів для різних експлуатаційних умов плавання.

10. На прикладі взаємодії буксир-судно отримано 6 *DoF* математичну модель взаємодії системи суден пов’язаної гнучким тросом, яка відрізняється урахуванням остійності та плавучості суден, натягу тросу, функціонування гвинто-рульових колонок, що дозволяє створювати симулятори роботи суден з буксирами та оцінювати можливість втрати керованості і остійності буксиру у різних експлуатаційних умовах.

11. На прикладі судна сейсмічної розвідки з буксируваною системою плавучих кабелів великої довжини отримано модель системи судно – несамохідній буксируваний об'єкт на гнучкому зв'язку, що дозволяє проводити симуляцію проходження небезпечних ділянок, з урахуванням зовнішніх факторів.

12. На прикладі ситуації розходження судна-цілі з кінцевим буєм сейсмічного кабелю, запропоновано метод зворотного розрахунку розходження суден з урахуванням дрейфу буксируваного об’єкту на гнучкому зв’язку.

13. Запропоновано метод визначення небезпечного зближення суден та маневру останнього моменту, залежно від маневрених характеристик судна та куту перетину курсів, у якому визначення потенціального контакту суден виконується віддаленням цілі від розрахункової точки зіткнення, що дозволяє зменшити кількість можливих небезпечних ситуацій, та у значної мірі уточнити і спростити розрахунки.

14. Запропоновано категоризацію зон навігаційного ризику та мінімального запасу під кілем, з урахуванням точності картографічної інформації; вдосконалено метод розрахунку безпечної глибини та визначення лімітуючих параметрів при плануванні навігаційного переходу судна, який відрізняється урахуванням комплексу параметрів безпеки.

15. Сформульовано критерій оцінювання найкоротшої дистанції розходження суден, з урахуванням параметрів судна та куту перетину курсів, що дозволяє аргументовано оцінювати небезпеку зіткнення суден.

16. На основі отриманих критеріїв оцінки безпеки судна розроблено методику кількісної оцінки ризику навігаційного інциденту з різнородними вхідними даними, засновану на концепції формальної оцінки безпеки та нечіткій логіці.

17. Експериментально, та за допомогою методів математичного моделювання, підтверджено, що отримані у дисертації основні наукові результати можуть використатися при розробці алгоритмів та моделей, які є частиною суднових систем підтримки прийняття рішень та навігаційних симуляторів при навчанні, перепідготовці і підвищенні кваліфікації

судноводіїв, та осіб, які відповідають за планування роботи флоту, під час розробки проектів експлуатації суден, портів, плануванні рейсу судна та моніторингу безпечного виконання процесів судноводіння.

Основні практичні результати дослідження впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес ЗВО, а також пройшли апробацію на наукових заходах міжнародного і державного рівня.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Pipchenko A. D.** Ship maneuvering with towed seismic equipment mathematical model // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 21. – Одесса: ИздатИнформ, 2012. – С. 178-184.

2. **Пипченко А. Д.** Формальная оценка безопасности при выполнении задач судна // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 23. – Одесса: ИздатИнформ, 2013. – С. 114-121.

3. **Пипченко О. Д.** Моніторинг та ідентифікація помилок під час навчання на навігаційних симуляторах // Суднобудування №2 2020, НУК, DOI https://doi.org/10.15589/znp2020.2(480).1, С. 3 - 11

4. **Піпченко О. Д.** Розробка робастного регулятора курсу судна на базі теорії штучних нейронних мереж / Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2013. - №1 – С. 137-142

5. **Пипченко А. Д.** Анализ аварийности мирового флота 2005-2015 // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 27. – Одесса: ИздатИнформ, 2017. – С. 159-168.

6. **Пипченко А.Д.** Математическое моделирование работы буксира с азимутальными движителями на тросе // Кораблебудування №2 2017, НУК http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/107345

7. **Пипченко А. Д.** Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна // Вестник Одесского национального морского университета 2 (51), Одесса: ОНМУ Вып. 2(51), 2017. – С. 156-164.

8. **Пипченко А. Д.** Расчет крена судна на циркуляции / Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (16), Херсон: ХГМА, 2017 – С. 61-67

9. **Пипченко А. Д.** К вопросу автоматизированного управления судном на траектории / А. Д. Пипченко, В. А. Шевченко // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 19. – Одесса: ИздатИнформ, 2010. – С. 149-155.

- *моделі руху суден, постановка обчислювального експерименту.*

10. **Пипченко А. Д.** Проблема выбора трансокеанского маршрута и пути ее дальнейшего исследования / А. Д. Пипченко, В. Г. Алексишин, Д. В. Астайкин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 19. – Одесса: ИздатИнформ, 2010. – С. 143-148.

- *методика пошуку оптимального маршруту, аналіз існуючих досліджень*

11. **Пипченко А. Д.** Особенности оценки опасности столкновения на

судах сейсмической разведки / А. Д. Пипченко, В. Г. Алексишин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 20. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – С. 3-7.

- *математична модель судна сейсмічної розвідки; методика оцінки небезпеки зіткнення*

12. **Пипченко А. Д.** Поиск оптимального закона в задаче автоматизированного регулирования курса судна / А. Д. Пипченко, В. Е. Сикирин // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 20. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – С. 165-174.

- *математична модель судна; математична модель нейронного регулятора курсу.*

13. Шевченко В. А., **Пипченко А. Д.**, Коваленко О. А. Анализ отказов и математическое моделирование ВРШ судов с системами динамического позиционирования // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 25. – Одесса: ИздатИнформ, 2015. – С. 162-171.

- *математична модель судна; моделювання процесу управління судном.*

14. **Пипченко А. Д.** Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / Пипченко А.Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 27. – Одесса: ИздатИнформ, 2017. – С. 169-176.

- *алгоритм уточнення математичної моделі судна на основі малої вибірки даних.*

15. **Пипченко А. Д.** Математическое моделирование динамики контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / Пипченко А.Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ ОМА, Вып. 28. – Одесса: ИздатИнформ, 2018. – С. 141-151.

- *алгоритм уточнення математичної моделі судна на основі малої вибірки даних.*

16. **Піпченко О. Д.,** Пернікоза В.В., Казак Ю.В., Бурчак А.І. Моделювання інцидентів при підготовці судноводіїв: зіткнення буксира і балкера // Судноводіння: Зб. наук. трудів НУ ОМА, Вип. 29. – Одесса: ІздатІнформ, 2019. – С. 164-172. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.164-172

- *постановка завдання. Контроль якості проведення експерименту. Формування висновків на основі даних експерименту.*

17. Буренков О. М., **Піпченко О. Д.,** Алексішин А. В. Практичні особливості розрахунку параметрів безпечної глибини при використанні ЕКНІС // Судноводіння: Зб. наук. трудів НУ ОМА, Вип. 30. – Одесса: ІздатІнформ, 2020. – С. 16-26. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.16-26

- *постановка задачі, розробка методів розрахунку та алгоритмів для програмного забезпечення..*

18. **Pipchenko O.D.** On the Method of Ship's Transoceanic Route Planning. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 5, No. 3, pp. 385-392, 2011 (***Web of science***).

19. **Pipchenko O.D.**, Tsymbal M., Shevchenko V.: Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth

Thrusters. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 3, doi:10.12716/1001.12.03.17, pp. 567-571, 2018. (***Web of science***).

- узагальнення рекомендацій, визначення перспективних напрямків досліджень дизель-електричних суден, обладнаних азимутними двигунами.

20. **Pipchenko O.** Robust Automatic Ship Heading Controller for Various Conditions // O. Pipchenko, V. Shevchenko / Marine Intellectual Technologies - Scientific journal № 4 (42) V.4 2018 pp. 208-214 (***Web of science***).

- постановка завдання, пропонування робастного алгоритму керування, аналіз результатів.

21. **Pipchenko O.D.**, Tsymbal M., Shevchenko V.: Features of an Ultra-large Container Ship Mathematical Model Adjustment Based on the Results of Sea Trials. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 14, No. 1, doi:10.12716/1001.14.01.20, pp. 163-170, 2020 (***Web of science***).

- алгоритм уточнення математичної моделі судна на основі малої вибірки даних. Визначення структури цільових функцій для поставленої задачі оптимізації.

22. **Pipchenko O.D.**, Kovtunenko D.: A Suggestion of an Application of Blended Learning in MET Through a Harmonized STCW Model. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 14, No. 3, doi:10.12716/1001.14.03.04, pp. 545-548, 2020 (***Web of science***).

- рекомендації щодо підготовки спеціалістів морського транспорту та схема підготовки змішаним способом.

23. **Pipchenko O.** Features of ship heading maneuvering in close quarters situation // Slovak international scientific journal: Vol. 1, №41, 2020 – pp. 39 – 46

24. **Pipchenko A.**, Tsymbal N. Development of Mathematical Algorithms for the Seismic Research Vessel Maneuvering Simulator / Proceedings of the INSLC 17 - International Navigation Simulator Lecturers' Conference, Hochschule Wismar, Rostock – Warnemuende, 2012. – 10 p.

- математична модель судна сейсмічної розвідки; методика оцінки небезпеки зіткнення; алгоритм врахування течії на сейсмічну косу.

25. **Pipchenko O.** Aspects of maritime resource management training for emergency steering scenarios on azimuth thrusters / O. Pipchenko, V. Shevchenko // ICERS 13, Odessa – 2017. – pp. 16-24

- особливості підготовки судноводіїв на суднах з ВРК.

26. Burenkov O., **Pipchenko O.** Monitoring and identification of errors during training on ECDIS simulators // Slovak international scientific journal: Vol. 1, №43, 2020 – pp. 46 – 50

- постановка задачі, класифікація помилок та методика їх оцінки.

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

1. Пипченко А. Д. Повышение надежности работы рулевых машин методами теории отказо-толерантного управления / Пипченко А. Д., Шевченко В. А. // Матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT - 2011)» Херсон, 2011. – с. 268 – 272.

2. Пипченко А. Д. Нечеткая логика и математическое моделирование в задаче оценки ситуации опасного сближения судов // Материалы международной научно-практической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2017», Херсон: ХДМА, - С. 9 – 12.

3. Пипченко А. Д. Определение условий потери управляемости и опрокидывания буксиров при помощи математического моделирования // Материалы всеукраинской научно-технической конференции «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», Николаев: НУК им. адм. Макарова, 2017 – С. 54-57.

4. Пипченко А. Д. Математическое моделирование плавучести крытой шлюпки на волнении // Материалы научно-технической конференции «Транспортні технології (морський і річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення та автоматизація», Одесса: НУ ОМА, 2017 – С. 51-53.

5. Піпченко О. Д. Моделювання інцидентів при підготовці і перевірці компетентності моряків: ситуація зіткнення буксира «НЕФТЕГАЗ-67» і судна «YAO HAI» / Перникоза В.В., Казак Ю.В., Бурчак А.І. // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація». 14-15.11.2019 – С. 72 – 75

6. Піпченко О. Д. Візуалізація качки динамічно-позиціонуємої баржі в реальному часі // Материалы международной научно-практической конференции «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020», Херсон: ХДМА, - С. 81 – 83.

7. Алексишин В. Г. Математическая статистика и теоретические основы судовождения / В. Г. Алексишин, **А. Д. Пипченко**, А. В. Алексишин. – Одесса: ОНМА, 2011. - 92 с.

- *аналіз літературних джерел, зміна існуючого матеріалу з урахуванням нових даних і технологій.*

8. **Пипченко А. Д.** Обработка и анализ навигационной информации. Курс лекций / А. Д. Пипченко, А. Л. Вагущенко – Одесса: ОНМА, 2011. - 92 с.

- *аналіз літературних джерел, зміна існуючого матеріалу з урахуванням нових даних і технологій.*

9. Піпченко О. Д. Комп'ютерна програма «Towing system». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 72915 від 18.07.2017

10. Піпченко О. Д. Комп'ютерна програма «Vessel floatation». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 77874 від 27.03.2018

11. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Планування маршруту за допомогою ЕКНІС (Passage Planning with ECDIS)». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 93129 від 16.07.2019

12. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Управління баластними операціями (Ballast water management)». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 92505 від 08.10.2019

13. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Radar navigation». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 100228 від 06.10.2020

14. Піпченко О. Д. Інтерактивний навчальний посібник «Mooring system management». Авторське свідоцтво. Свідоцтво Мінекономрозвитку України № 100229 від 06.10.2020

АНОТАЦІЯ

Піпченко О. Д. Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (271 – річковий та морський транспорт). – Національний університет "Одеська морська академія", м. Одеса, 2021.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення безпечної експлуатації засобів водного транспорту, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих, методів кількісного оцінювання та управління ризиками при виконанні комплексних навігаційних задач.

Досліджено статистику аварійності світового флоту та окремі навігаційні інциденти, включаючи моделювання інцидентів на навігаційних симуляторах під час процесу підготовки судноводіїв, на основі чого отримано структуру найбільш частіших помилок, які призводять до зіткнень чи посадки на мілину.

Досліджено та удосконалено низку методів математичного моделювання руху судна з використанням як спрощених лінійних моделей так і моделей руху у просторі. Побудовано моделі взаємодії груп суден, як незалежних в одному віртуальному середовищі, так і пов’язаних гнучкими зв’язками (система буксир-судно, судно сейсмічної розвідки з системою плавучих кабелів). Отримані моделі реалізовано у виді програмного забезпечення, як для розрахунків, так і в навчальних симуляторах.

Отримали подальший розвиток методи оцінки безпеки зіткнення та посадки на мілину з урахуванням маневрових характеристик судна та амплітудно-частотних характеристик його хитавиці.

Отримано метод операційної оцінки ризику контакту з небезпекою

залежно від кінематичних характеристик ситуації (час та дистанція до небезпеки, дистанція найкоротшого зближення) та маневрових характеристик судна.

Розроблено алгоритми та реалізовано у вигляді програмного забезпечення для планування та оцінки безпеки навігаційного маршруту судна на ЕКНІС (електронна картографічна навігаційна та інформаційна система).

Ключові слова: навігаційна задача, кількісна оцінка ризику, ефективність, система підтримки прийняття рішень, математичне моделювання, нечітка логіка.

ANNOTATION

O. D. Pipchenko. Development of theory and practice for the risk management of complex navigational tasks. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the Doctor of Technical Science degree on the specialty 05.22.13 – navigation and control (271 – river and maritime transport). – National university "Odesa maritime academy", Odesa, 2021.

The thesis scientifically establishes and validates a new conceptual solution to the important scientific and technical problem of improving the safety of maritime transport operation, which is achieved by using the first introduced and improved existing methods of risk quantitative assessment and management during complex navigational tasks performance.

The world fleet incident statistics is investigated and specific cases, including incidents reconstruction on navigation simulators during the deck officers training, are studied, from which the structure of the most frequent errors leading to navigational incidents is obtained.

Number of mathematical vessel motion modelling methods with the use of both simplified linear models and space motion models are studied and improved. Interaction models for vessel groups both independent in a common virtual environment and with flexible connections (a tow-vessel system, a seismic vessel with a system of floating cables) are developed. The obtained models are implemented in the form of software used in operations planning and training simulators.

Methods for assessing the risk of collision and grounding are further researched, taking into account the vessel manoeuvrability and frequency-response functions of vessel motions.

The methods for operational risk assessment of contact with navigational hazard depending on the motion characteristics of the situation (time and distance to the hazard, the closest point of approach) and vessel manoeuvring characteristics are obtained.

Algorithms in the form of software for passage planning and route safety assessment with ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) are developed and implemented.

Keywords: navigation problem, quantitative risk assessment, efficiency, decision support system, mathematical modelling, fuzzy logic.

Підп. до друку 17.03.2021. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,33.
Тираж 100 пр. Зам. № И20-12-32

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