

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



Янчецький Олександр Віталійович

УДК 656.61.052

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ
СУДЕН ВРАХУВАННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ МАНЕВРУ
РОЗХОДЖЕННЯ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Бурмака Ігор Олексійович,
завідувач кафедри управління судном
Національного університету "Одеська морська академія",

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Журавська Ірина Миколаївна,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
Чорноморського національного університету імені
Петра Могили, Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

кандидат технічних наук, доцент
Товстокорий Олег Миколайович,
завідувач кафедри управління судном
Херсонської державної морської академії
Міністерства освіти і науки України, м. Херсон.

Захист відбудеться 16 грудня 2021 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті "Одеська морська академія" за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал 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://onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Автореферат розісланий 16 листопада 2021 р.

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



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зростання швидкостей та підвищення інтенсивності руху на водних шляхах, збільшення розмірів транспортних суден, плавання в складних навігаційних умовах роблять проблему забезпечення безаварійності судноплавства однією із найбільш пріоритетних і актуальних. Від її вирішення залежить зменшення кількості аварійних випадків, що сприяє охороні людського життя на морі, зниженню шкоди навколишньому середовищу і майну.

Плавання морських суден в стислих водах ускладнює інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки, які сприяють появі аварійних ситуацій та характеризуються швидкоплинними змінами. Вказана особливість плавання в стислих водах потребує розробки сучасних методів оцінки ситуації зближення та вибору маневру розходження, чого можна досягти використанням комп'ютерних інформаційних технологій. Тому розробка сучасних засобів оперативного управління процесом розходження суден з урахуванням їх ефективності, чому присвячена дана дисертаційна робота, є актуальним науковим напрямом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася відповідно до рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008), положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), а також згідно з планами наукових досліджень національного університету «Одеська морська академія»: за держбюджетною темою «Розробка методів безаварійного плавання суден в прибережних районах навігації» (№ ДР 0120U102611, 2021 р.), в якій здобувачу належить виконаний підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом вдосконалення управління процесом розходження суден з урахуванням переваг існуючих аналітичних систем попередження зіткнень суден.

Наукова гіпотеза дисертаційного дослідження полягає у допущенні про можливість підвищення оперативності і безпечності вибору параметрів оптимального маневру розходження суден шляхом застосування більш ефективних засобів їх визначення.

Головна задача дослідження полягає в розробці оперативного методу вибору маневру розходження з використанням характеристик найбільш ефективних аналітичних систем попередження зіткнень суден.

Для вирішення головної задачі дисертації методами теорії дослідження операцій було проведено її розділення на три незалежні складові задачі:

1. Формування способу оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден.
2. Процедура визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення.

3. Розробка методу визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються.

Об'єктом дослідження дисертації є попередження зіткнення суден.

Предметом дослідження є методи оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнення суден.

Методи дослідження. Для пошуку рішень поставлених задач у дисертаційному дослідженні були використані наступні методи:

- дедукції для аналізу основних напрямів вирішення проблеми безпеки судноводіння;

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;

- системного аналізу для вибору теми дисертаційної роботи і при обґрунтовані методологічного забезпечення і технології наукового дослідження;

- теорії вірогідності для оцінки вірогідності рівня небезпеки зближення суден;

- теорії ієрархічних багаторівневих систем для формалізації системи ухвалення рішень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні нового ефективного методу визначення параметрів стратегії розходження суден, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням принципу зовнішнього управління розходженням незалежно від наявності СУРС та використанням способу автоматичного сканування для визначення оптимальних курсів ухилення.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден;

- вперше запропоновано процедуру визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення;

- одержав подальший розвиток метод визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання його результатів розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для розходження судна в ситуаціях небезпечного зближення.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «Акомарін(Одеса)» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 19.04.2021 р.), Азовським морським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт впровадження від 14.04.2021 р.), та малим приватним підприємством «Трансконтинентальне сейсмопрогнозове бюро» (акт впровадження від 11.05.2021 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Розробка методів безаварійного

плавання суден в прибережних районах навігації» (№ ДР 0120U102611, 2021 р.), в якій здобувачу належить виконаний підрозділ.

Під час виконання дисертаційної роботи наступний патент було отримано:

- патент на корисну модель № 143062 «Стенд для дослідження опору руху моделей транспортних засобів». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 10.07.2020, Бюл. № 13.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота здобувача виконана самостійно: ним виявлено та проаналізовано найбільш важливі напрями вирішення проблеми зниження аварійності судноводіння, він провів пошук інформації по даній проблематики та обґрунтував методологічне забезпечення дисертаційної роботи, здобувач розробив і запропонував спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден з урахуванням їх основних характеристик, ним також запропоновано процедуру визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення, дисертантом імітаційним комп'ютерним моделюванням підтверджено коректність одержаних в роботі теоретичних результатів, ним впроваджено результати дисертаційного дослідження в виробничий процес. В дисертації із наукових праць, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті положення, які належать автору особисто: формалізація маневру останнього моменту [1], аналіз ефективності способів розходження суден [2], процедура оцінки вірогідності рівня небезпеки зближення суден [3], процедура визначення групи суден при небезпечному зближенні [4].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і були схвалені на науково-технічних конференціях: науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2020 р.), ІХ Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), 24 Міжнародна наукова конференція «Transport Means 2020 Sustainability: Research and Solutions» (Каунас, 30 серпня-2 жовтня 2020 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 9 наукових праць (з них 4 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 4 наукових статті [1-4]; в зарубіжних наукових профільних виданнях - 2 наукові статті [5, 6]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 3 доповіді [7 – 9].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (133 найменування) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 199 сторінок і містить 67 рисунків та 4 таблиці, зокрема: 177 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 6 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ дисертаційної роботи містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її зв'язок із програмами наукових досліджень університету, визначення мети дисертації, формулювання його головної та незалежних складових задач. Приведено наукову новизну роботи та її практичне значення.

У **першому розділі** проведено огляду літературних джерел, на базі якого проаналізовано основні напрями вирішення проблеми зниження аварійності суден. Показано, що значний внесок у вирішення проблеми забезпечення безаварійності судноводіння зробили вітчизняні вчені Вагущенко Л.Л., Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Цимбал М.М., Бурмака І.О., Ворохобін І.І. та іноземні вчені Hornauer S, Lisowski J., Statheros T.

Аналіз літературних джерел показав, що центральним напрямом рішення вказаної проблеми являється розробка сучасних методів попередження зіткнень суден.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню теми дослідження та його методологічного забезпечення.

В розділі за допомогою методів системного підходу сформовано технологічну карту дисертаційної роботи, яка містить мету, головну задачу дослідження, робочу гіпотезу, також в карті визначено об'єкт і предмет дисертації. Методами теорії дослідження операцій було розділено головну задачу дисертації на три складові задачі.

У **третьому розділі** представлено матеріали і методи, які потрібні для вирішення головної задачі дисертаційного дослідження.

В ньому розглянуто апріорну оцінку вірогідності безпечної проводки судна стислим маршрутом, причому характеристика аварійності суден представлена потоками аварійних подій.

Приведена математична модель визначення вірогідності безаварійного плавання судна по вибраному маршруту за допомогою двовимірної щільності розподілу позиційної похибки. Також розглянуто альтернативний спосіб визначення апріорної вірогідності в рамках одновимірного простору з використанням одновимірної щільності розподілу похибки бічного відхилення судна щодо програмної траєкторії руху. Показано, що безпека судноводіння в стислих умовах залежить від векторіальної похибки управління судном.

Розглянуто застосування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, причому приведені способи формування області небезпечних значень курсів суден, області неприпустимих значень швидкостей пари суден і області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна.

Також приведені процедура розрахунку меж області неприпустимих значень курсів суден у разі застосування судових безпечних доменів еліптичної і прямокутної форми.

У разі локально-незалежного управління процесом розходження суден

розглянуто використання областей неприпустимих значень параметрів руху базового судна для розходження знизженням швидкості активним або пасивним гальмуванням.

Розглянуто методи формування областей неприпустимих значень параметрів розходження базового судна, до яких відносяться область неприпустимих значень параметрів ухилення судна і область допустимих значень курсів ухилення і моментів часу повороту на курс виходу.

Також приведено маневри розходження судна з двома небезпечними цілями, для чого розроблені спосіб розходження судна з двома небезпечними цілями послідовними ухиленнями використовуючи область неприпустимих значень курсів ухилення і область допустимих комбінованих маневрів розходження судна з двома цілями зміною курсу і його гальмуванням.

Таким чином, у розділі розглянуто матеріали і методи, необхідні для вирішення головної задачі дисертаційного дослідження.

Матеріали розділу опубліковано в роботі [1].

У **четвертому розділі** розроблено спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден та процедуру визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення, чому присвячені перша та друга складові задачі дисертаційного дослідження.

В розділі зазначається, що у реальних умовах плавання в районах інтенсивного судноплавства потрібно здійснювати постійне спостереження за навколишніми суднами з метою завчасного виявлення ситуації небезпечного зближення. Тому необхідно формалізувати процес ухвалення рішення по попередженню зіткнень суден, який містить наступні етапи:

1. Контроль навколишнього оточення, в першу чергу відносної позиції і параметрів відносного руху.
2. Провести аналіз наявності ситуації зближення суден.
3. Оцінка рівня безпеки зближення суден.
4. Якщо зближення суден небезпечне, то визначити тип взаємодії для безпечної розходження.
5. Вибір стратегії розходження.

Розділ містить спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден.

Зараз запропоновано до використання різні аналітичні системи попередження зіткнень суден при локально-незалежному і зовнішньому управлінні їх процесом розходження, для порівняльного аналізу яких слід розглянути складові процесу ухвалення рішення з потреби розходження суден при їх зближенні і, у разі її наявності, вибору стратегії розходження.

На першому етапі процесу ухвалення рішення за допомогою ЗАРП або АІС виявляються навколишні рухомі об'єкти, для яких вимірюються параметри руху і відносного положення. На цьому етапі визначаються відносний курс K_{ot} і швидкість V_{ot} за допомогою відомих виразів:

$$K_{ot} = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}],$$
$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2},$$

де K_1 , V_1 , K_2 і V_2 - параметри руху суден.

На другому етапі процесу ухвалення рішення, використовуючи зміряні параметри, необхідно розрахувати значення швидкості зміни дистанції між суднами, враховуючи, що при її негативному значенні судна зближуються. Значення швидкості зміни дистанції між суднами розраховується за допомогою виразу:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}),$$

де α - пеленг з одного судна на інше судно.

На третьому етапі процесу ухвалення рішення при зближенні суден проводиться оцінка ступеня його небезпеки, для чого прогнозується розвиток ситуації зближення до моменту часу їх найкоротшого зближення, яке характеризується дистанцією D_{min} :

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

де D - дистанція між суднами.

Рівень небезпеки зближенні суден характеризується ситуативним збуренням, яке виникає при прогнозованому попаданні суден в домен неприпустимих позицій. Воно виникає тоді, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення D_{min} менше значення гранично - допустимої дистанції зближення, величина якої залежить від форми домену неприпустимих позицій і ракурсу зближення суден. При небезпечному зближенні ситуативне збурення ω може приймати значення 1 або 2.

Після того, як виявлена наявність небезпеки зіткнення, на четвертому етапі ухвалення рішення слід визначити тип взаємодії суден, що зближуються, враховуючи принцип управлінні їх процесом розходження. Особливо істотно це для принципу локально-незалежного управління процесом розходження, коли необхідна координація взаємодії суден при небезпечному зближенні.

На п'ятому етапі ухвалення рішення слід вибрати стратегію розходження, причому при локально-незалежному управлінні процесом розходження вибір стратегії розходження проводиться залежно від ступеня небезпеки ситуації зближення, тобто значення ситуативного збурення, виходячи з координації маневрів суден, що зближуються, передбаченої МППЗС-72. В цьому випадку характер маневру розходження також визначається значенням ситуативного збурення. У випадку $\omega = 1$ передбачене застосування стандартного маневру розходження, а при значенні $\omega = 2$, що характерне для надмірного зближення суден, щоб уникнути зіткнення слід використовувати маневр екстреного розходження.

Принципово важливим є число суден, що небезпечно зближуються. У разі, коли небезпечно зближуються більше двох суден, стратегія розходження формується з урахуванням матриці ситуативного збурення, яка як елемент містить значення ситуативного збурення відповідної пари суден.

Як показник ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден доцільно запропонувати вірогідність безпечного завершення процесу

розходження, яка є добутком вірогідностей P_i успішного результату етапів процесу ухвалення рішення по вибору стратегії розходження:

$$P_{sf} = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5.$$

Надалі для оцінки вірогідність безпечного завершення процесу розходження P_{sf} необхідно знайти аналітичні вирази для вірогідності позитивного результату кожного з етапів процесу ухвалення рішення по вибору стратегії розходження P_i .

Відзначимо, що перші три етапи ухвалення рішення по вибору стратегії розходження можна характеризувати загальною вірогідністю відсутності небезпеки зіткнення за умови, що дистанція найкоротшого зближення рівна заданій гранично - допустимій дистанції зближення. Для цього в роботі розглянуто похибку дистанції найкоротшого зближення ΔD_{\min} і вираз для щільності її розподілу. Залежність похибки дистанції найкоротшого зближення ΔD_{\min} від похибок вимірювання дистанції ΔD і пеленга $\Delta \alpha$ має наступний вигляд:

$$\Delta D_{\min} = D \cos(\alpha - K_{ot}) \Delta \alpha + \Delta D |\sin(\alpha - K_{ot})|,$$

Припускаючи, що похибки ΔD і $\Delta \alpha$ розподілені по нормальному закону з дисперсіями σ_D^2 і σ_α^2 можна записати вираз для щільності $f_b(\Delta D_{\min})$:

$$f_b(\Delta D_{\min}) = A_n \exp\left\{-\frac{[\Delta D_{\min}]^2}{2[\sigma_D^2 \sin^2(\alpha - K_{ot}) + \sigma_\alpha^2 D^2 \cos^2(\alpha - K_{ot})]}\right\},$$

$$\text{де } A_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_D^2 \sin^2(\alpha - K_{ot}) + \sigma_\alpha^2 D^2 \cos^2(\alpha - K_{ot}))}}.$$

Маючи в своєму розпорядженні вираз для щільності розподілу, можливо визначити вірогідність P_b того, що у разі рівності $D_{\min} = D_d$ при зближенні суден не виникне зіткнення. Очевидно, шукана вірогідність рівна вірогідності того, що похибка ΔD_{\min} не перевершить величину $D_{\min} - D_{dt}$, де через D_{dt} позначено радіус детермінованої області, що враховує габарити судна і явище присмоктування. З урахуванням одержаного виразу для щільності розподілу $f_b(\Delta D_{\min})$ одержимо:

$$P_b = P\{\Delta D_{\min} < D_{\min} - D_{dt}\} = \int_0^{D_{\min} - D_{dt}} f_b(\Delta D_{\min}) d\Delta D_{\min}, \text{ або } P_b = \int_0^{D_{\min} - D_{dt}} f_b(\Delta D_{\min}) d\Delta D_{\min}.$$

Одержана вірогідність P_b визначає сприятливий результат першого етапу.

У розділі представлені результати аналізу МППЗС-72, який показав невизначеності, що значно знижують безпеку маневру розходження.

Невизначеність у взаємодії суден виникає ще на етапі оцінки рівня небезпеки ситуації зближення, так як в реальних умовах плавання величина гранично - допустимої дистанції найкоротшого зближення визначається суб'єктивно судноводієм, причому на судах, що зближуються, можуть по-різному оцінювати ситуацію, що складається. Наслідки такої сумісної суперечливої оцінки можуть виявитися не передбачуваними і привести до аварійної ситуації.

У разі визначення області взаємних обов'язків можливі два варіанти: обидва судна визначили одну і ту ж область або різні суміжні області. Коли одне із суден розцінює ситуацію зближення безпечною, а друге судно вважає наявність першої області взаємних обов'язків, можливі наступні типи взаємодій.

У першому випадку (результат Z_{01}) припустимо, що перше з суден оцінило зближення як небезпечне, і таким, як судно, якому поступаються дорогу. Друге ж судно вважає зближення безпечним і взагалі не має наміру маневрувати. Через деякий час перше судно, згідно Правилу 17, вживає заходів по попередженню зіткнення і починає маневрувати поблизу другого судна, викликаючи можливу реакцію другого судна, що може погіршити ситуацію аж до зіткнення. У другому випадку (результат Z_{02}) друге судно виконує маневр розходження і зіткнення попереджається.

Якщо кожне з суден визначило першу область взаємних обов'язків, тобто реалізувався результат Z_1 , то судам необхідно визначити свої маневри, які складають стратегію розходження.

У першій області взаємних обов'язків однією з найбільш невизначених є ситуація розходження двох суден, що мають, згідно Правилу 18, однаковий підвищений пріоритет, наприклад, двох рибаків, або суден, обмежених своїм осіданням і т. п. В такій ситуації МППЗС – 72 не координують взаємодію суден, що розходяться, що посилює і без того їх скрутне положення, збільшуючи ризик небезпеки зіткнення при їх розходженні. Дану ситуацію характеризуватимемо не координованим результатом Z_{11} .

Проте і у разі розходження суден з механічним двигуном виникає ряд невизначених ситуацій. Однією з таких ситуацій є ситуація, коли судна з механічним двигуном рухаються прямо назустріч один одному. Згідно Правилу 14 два судна з механічним двигуном, які рухаються назустріч один одному повинні відвернути вправо і чисто розійтися лівими бортами. Відзначимо, що такий маневр розходження вимагає певної синхронізації в маневруванні обох суден, що Правилами ніяк не регламентовано. Тому можливе виникнення небезпеки зіткнення. Описана ситуація відповідає результату Z_{12} .

Також можлива ситуація, в якій два судна з механічним двигуном знаходяться на зустрічних паралельних курсах, проте курсові кути перевершують значення, характерні для ситуації Правилу 14, причому дистанція найкоротшого зближення менше гранично - допустимої дистанції. Наприклад, якщо дистанція між суднами близько трьох миль, то при

гранично - допустимій дистанції 0,5 милі курсові кути можуть досягати не менше 10 градусів. Така ситуація зближення є небезпечною і може характеризуватися першою областю взаємних обов'язків. Проте приведена ситуація не потрапляє ні під Правило 14, ні під Правило 15 (пересічні курси). Отже, така ситуація МППЗС – 72 не регламентується чіткою і однозначною координацією, що створює невизначеність при маневруванні і з'являється загроза зіткнення суден, що розходяться. Розглянуту ситуацію віднесено до результату Z_{13} .

Розглянуто результат, коли обидва судна ідентифікували другу область взаємних обов'язків. Об'єктивні критерії оцінки такої області в МППЗС – 72 відсутні, тому втрата прогнозу в ситуації небезпечного зближення, що ускладнюється, і фактична відсутність координації в другій області взаємних обов'язків різко знижує безпеку процесу розходження. Отже, результат Z_2 є не координованим результатом.

За ситуації, коли обидва судна ідентифікували третю область взаємних обов'язків, реалізується результат Z_3 , який характеризується повною невизначеністю у взаємодії суден і відсутністю координації. У такій ситуації дуже великий ризик зіткнення суден.

Розглянемо результат Z_4 , коли одне з суден визначає першу область взаємних обов'язків і повинне поступитися дорогою, а друге судно ідентифікувало другу область взаємних обов'язків і себе як пасивне судно. У такій ситуації Правилами не координується взаємодія суден і маневр другого судна може повести до виникнення ризику зіткнення. Отже, результат Z_4 відноситься до не координованих результатів.

У разі реалізації результату Z_5 , при якому одне з суден визначає першу область взаємних обов'язків і себе як пасивне судно, а інше судно - другу область взаємних обов'язків і повинне поступитися дорогою, діючи згідно Правилам судна проводять узгоджений маневр розходження. Тому результат Z_5 є координованим результатом.

Результати Z_6 і Z_7 мають місце, коли одне з суден ідентифікувало другу область взаємних обов'язків, а інше - третю область. Якщо судно в другій області взаємних обов'язків є активним, то реалізований результат Z_6 , причому маневри обох суден не координовані. Якщо ж судно з другою областю взаємних обов'язків є пасивним, то виникає результат Z_7 , при якому не виникає ризик зіткнення суден.

Слід зазначити, що МППЗС – 72 координує взаємодію тільки двох суден в умовах відкритого моря, тобто наявність другої небезпечної цілі або судна, що заважає, як і навігаційних небезпек, в Правилах не передбачена. Тому можливі ще два результати - Z_8 , в ситуації небезпечного зближення суден за наявності третього судна і Z_9 , у випадку, якщо в районі проведення маневру розходження знаходяться навігаційні небезпеки. Перераховані два результати порушують координацію взаємодії суден при розходження.

Підведемо підсумки щодо розглянутих результатів, помістивши їх в табл. 1.

Слід зазначити, що результати, передбачені Правилами 9-15, є координованими з показниками рівними 1. Всього число результатів рівне 20. Сума показників координованості рівна 12,5, отже, середній показник рівний 0,625. Тому МППЗС – 72, як система бінарної координації, згідно середньому показнику, найближче характеризується частковою координованістю. Виходячи з викладеного, можна допустити, що за відсутності координованості два з трьох випадків завершуються безпечно, а

Таблиця 1.

Результати аналізу

№ п/п	Результат	Характеристика координованості	Показник
1	Z_{01}	частково координований	0,5
2	Z_{02}	координований	1
3	Z_{11}	відсутність координації	0
4	Z_{12}	частково координований	0,5
5	Z_{13}	частково координований	0,5
6	Z_2	відсутність координації	0
7	Z_3	відсутність координації	0
8	Z_4	відсутність координації	0
9	Z_5	координований	1
10	Z_6	відсутність координації	0
11	Z_7	координований	1
12	Z_8	частково координований	0,5
13	Z_9	частково координований	0,5

при повній координації всі три випадки безпечні, тому вірогідність безпечного завершення цього етапу P_k може бути оцінена, як відношення $2,625/3$, тобто $=P_k 0,875$.

В розділі також розглянуто альтернативну систему бінарної координації, в якій враховується вимога закону необхідної різноманітності Ешбі і показано, що така система бінарної координації характеризується вірогідністю безпечного завершення даного етапу $P_k = 0,952$.

Черговим етапом процесу ухвалення рішення по попередженню зіткнень суден є вибір стратегії розходження. Тому розглянуто вірогідність коректного вибору оптимальної стратегії розходження.

В даний час проводиться інтенсивна розробка способів оцінки наявності загрози зіткнення суден, що зближуються, і вибору оптимальної стратегії їх розходження використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, які можуть бути застосовні як для локально-незалежного, так і повного зовнішнього управління процесом розходження суден. Причому використовуються області Ω_k неприпустимих значень курсів пари суден та

Ω_V неприпустимих значень швидкостей пари суден, а також Ω_{KV} неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна, які застосовуються при зовнішньому управлінні процесом розходження суден. В разі локально-незалежного управління процесом розходження суден використовується область Ω_d неприпустимих значень параметрів руху судна, небезпечні області Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна, а також області $Q_{K,ty}$ та $Q_{K,tb}$ неприпустимих параметрів ухилення та виходу судна на траєкторію руху.

Для використання вказаних способів оператору потрібен незначний час, тому вірогідність коректного вибору оптимальної стратегії розходження P_s можна прийняти практично рівній одиниці, тобто $P_s = 1$.

В розділі проведено оцінку ефективності основних аналітичних систем попередження зіткнень суден, причому через S_{1i} позначено системи з локально-незалежним управлінням процесом розходження, а через S_{2i} - із зовнішнім управлінням процесом розходження.

До цих систем відносяться наступні:

- S_{11} - координація за допомогою МППЗС-72, для вибору маневру розходження використовуються області Ω_d і Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна;
- S_{12} - координація за допомогою альтернативної системи бінарної координації, для вибору маневру розходження використовуються області Ω_d і Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна;
- S_{13} - координація за допомогою системи координації трьох суден, для вибору маневру розходження використовуються області Ω_d і Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна;
- S_{14} - координація за допомогою МППЗС-72, для вибору маневру розходження використовуються області $Q_{K,ty}$ і $Q_{K,tb}$ або Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна;
- S_{15} - координація за допомогою альтернативної системи бінарної координації, для вибору маневру розходження використовуються області $Q_{K,ty}$ і $Q_{K,tb}$ або Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна;
- S_{16} - координація за допомогою системи координації трьох суден, для вибору маневру розходження використовуються області $Q_{K,ty}$ і $Q_{K,tb}$ або Θ_{dV} при активному і пасивному гальмуванні судна.
- S_{21} - для вибору маневру розходження використовуються області Ω_K і Ω_V при активному і пасивному їх гальмуванні;

- S_{22} - для вибору маневру розходження використовуються області Ω_{KV} , а також області Ω_V при їх активному і пасивному гальмуванні.

В табл. 2 для перерахованих аналітичних систем попередження зіткнень суден приведена їх ефективність, враховуючи вірогідності P_k і P_s . Вірогідність P_b не залежить від типу аналітичних систем попередження зіткнень суден, а лише від похибки дистанції найкоротшого зближення, тому для всіх аналітичних систем приймаємо однакову вірогідність, значення якої рівне деякій величині, тобто $P_b = P_{con}$.

Таблиця 2

Значення вірогідностей P_k і P_s та ефективності P_{sf}

Системи	P_b	P_k	P_s	Ефективність P_{sf}
S_{11}	P_{con}	0,875	1	$0,875P_{con}$
S_{12}	P_{con}	0,952	1	$0,952P_{con}$
S_{13}	P_{con}	0,976	1	$0,976P_{con}$
S_{14}	P_{con}	0,883	1	$0,883P_{con}$
S_{15}	P_{con}	0,976	1	$0,976P_{con}$
S_{16}	P_{con}	0,998	1	$0,998P_{con}$
S_{21}	P_{con}	1	1	P_{con}
S_{22}	P_{con}	1	1	P_{con}

Аналіз табл. 2 показує, що мінімальне значення ефективності P_{sf} властиво існуючим аналітичним системам попередження зіткнень суден (S_{11} , S_{14}) з локально-незалежним управлінням процесом розходження і координацією за допомогою МППЗС-72. Найбільшим значенням ефективності P_{sf} характеризуються аналітичні системи S_{21} і S_{22} із зовнішнім управлінням за умови застосування сучасних методів оцінки наявності загрози зіткнення суден, що зближуються, і вибору оптимальної стратегії їх розходження використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден.

Проте зовнішнє управління процесом розходження в даний час може бути реалізоване тільки системою управління рухом суден (СУРС), що з економічних міркувань можливе тільки в деяких ділянках стислих вод. Тому доцільно провести розробку аналітичної системи, яка б використовувала зовнішнє управління процесом розходження і не вимагала застосування СУРС. Така аналітична система повинна вирішувати дві послідовні задачі. По-перше, в умовах інтенсивного судноплавства визначити групу взаємодіючих суден при виникненні ситуації небезпечного зближення. По-друге, за допомогою методів зовнішнього управління процесом розходження

автоматично вирішити задачу вибору стратегії розходження зміною параметрів руху і виділити індивідуальний маневр розходження кожного з суден, що входить в одержану в результаті рішення сумісну стратегію.

В розділі запропоновано процедуру формування групи взаємодіючих суден для визначення сумісної стратегії розходження з метою компенсації ситуативного збурення. Суднова інформаційна система як перше судно C_1 формованої групи взаємодії, вибирає судно, на якому вона встановлена. Подальші судна включаються в початкову групу, виходячи з таких міркувань. Умови зупинки включення суден початкової множини Mn_0 в початкову групу суден Σ_0 полягають в наступному. По-перше, якщо дистанція до судна L_i перевершує граничну L_{max} , i , по-друге, якщо інтервал часу до початку взаємодії з i -м судном Δt_{bi} перевершує глибину прогнозу Δt_n . Потім визначається небезпека зближення з кожним із виділених суден, починаючи з того, до якого дистанція мінімальна. Якщо небезпека зіткнення з судном C_i відмінна від нуля і виконується умова $\Delta t_n > \Delta t_{bi}$, то судно включається в початкову групу суден Σ_0 . Формування початкової групи продовжується до тих пір, поки не набуде чинності обмеження по максимальній дистанції. Тим суднам, ситуативне збурення яких не рівне нулю, інформаційна система базового судна C_1 передає повідомлення з пропозицією про включення їх в групу суден, що небезпечно зближуються Σ_d . Якщо пропозиція прийнята, то судно, що відповідає, включається в групу Σ_d , а іншому випадку воно ідентифікується, як судно, що заважає.

Таким чином, в четвертому розділі дисертації розроблено спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден та процедуру визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [3-7].

У **п'ятому розділі** розроблено метод визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються та приведено результати його імітаційного моделювання, що являється третьою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі розглянуто умову вибору оптимальної стратегії розходження для ситуації небезпечного зближення чотирьох суден при зміні їх курсів, що має вигляд:

$$Q_4^{(\Sigma)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min$$

$$\begin{aligned} \min D_{12}(\Delta K_1, \Delta K_2) &> D_d, \\ \min D_{13}(\Delta K_1, \Delta K_3) &> D_d, \\ \min D_{14}(\Delta K_1, \Delta K_4) &> D_d, \\ \min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3) &> D_d, \\ \min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4) &> D_d, \\ \min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) &> D_d, \end{aligned}$$

де ΔK_i - приріст курсу i -го судна;

$\min D_{ij}(\Delta K_i, \Delta K_j)$ - дистанція найкоротшого зближення між i -м та j -м суднами;

D_d - гранично - допустима дистанція зближення.

Для пошуку оптимальної стратегії розходження за допомогою вище приведеної умови в розділі був запропонований алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження способом сканування, який показано на рис.1.

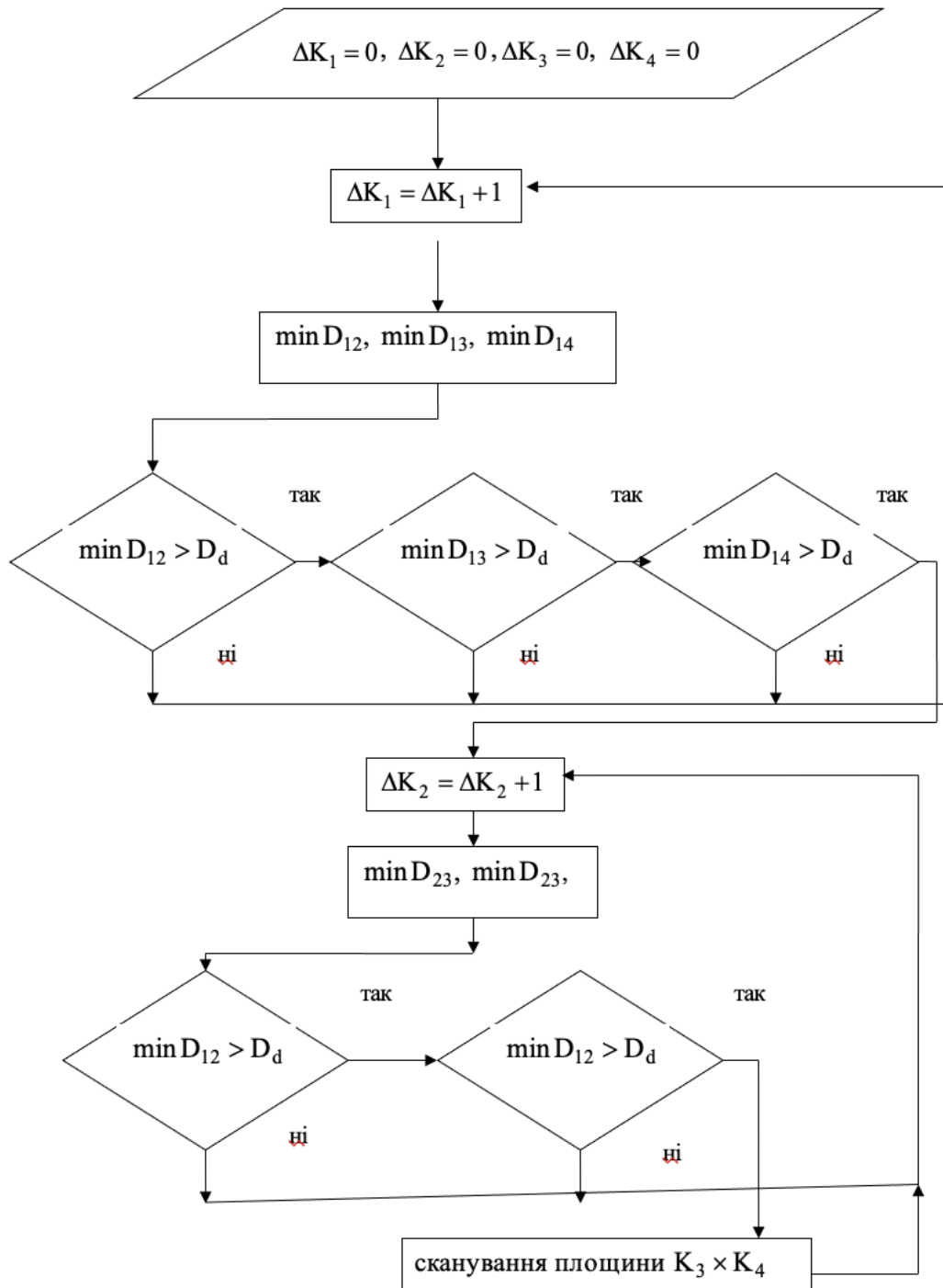


Рис. 1. Алгоритм пошуку оптимальної стратегії розходження

Відзначимо, що аналогічно проводиться визначення оптимальної стратегії розходження способом сканування для ситуацій небезпечного зближення двох, трьох і п'яти суден.

Для ситуації небезпечного зближення трьох суден за допомогою розглянутого алгоритму була розроблена імітаційна програма визначення оптимальної стратегії розходження. Програмою передбачене введення параметрів ситуації небезпечного зближення, розрахунок курсів ухилення суден для безпечної розходження і перевірка її коректності шляхом програвання одержаної стратегії. Як приклад розглянуто наступну ситуацію небезпечного зближення трьох суден, яка показана на рис. 2 і характеризується наступними параметрами:

$K_1 = 87^\circ$, $K_2 = 188^\circ$, $K_3 = 347^\circ$, $V_1 = 18$ вуз, $V_2 = 24$ вуз, $V_3 = 18$ вуз,
 $\alpha_{12} = 45^\circ$, $\alpha_{13} = 135^\circ$, $\alpha_{23} = 180^\circ$, $D_{12} = 3,5$ м, $D_{13} = 3,5$ м, $D_{23} = 5,0$ м.

Програмою були розраховані значення курсів ухилення всіх трьох суден, що небезпечно зближуються, які рівні наступним значенням:

$$K_{1y} = 56^\circ, K_{2y} = 169^\circ, K_{3y} = 347^\circ.$$

Звертаємо увагу, що для безпечної розходження досить зміни курсів першого і другого суден.

Розглянемо перший етап перевірки коректності стратегії розходження трьох суден.

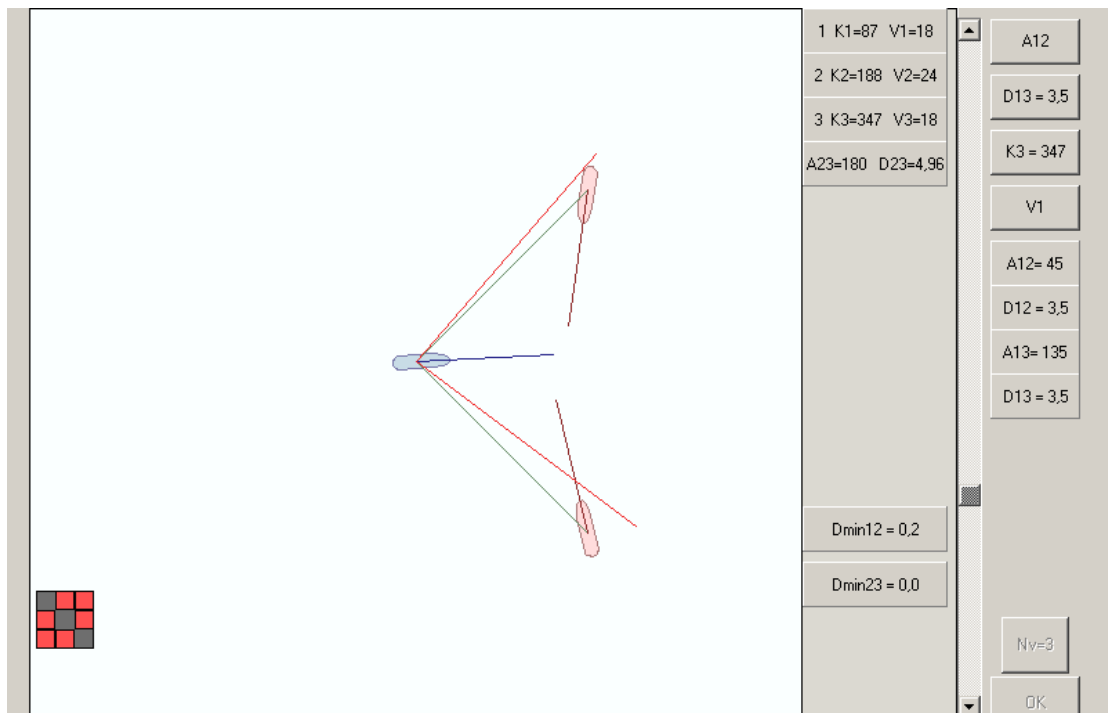


Рис. 2. Ситуація небезпечного зближення трьох суден

Із рис. 3 видно, що для розрахованих курсів ухилення $K_{1y} = 56^\circ$ і $K_{2y} = 169^\circ$, перше і друге судна безпечно розходяться, причому дистанція найкоротшого зближення складає 1,63 милі.

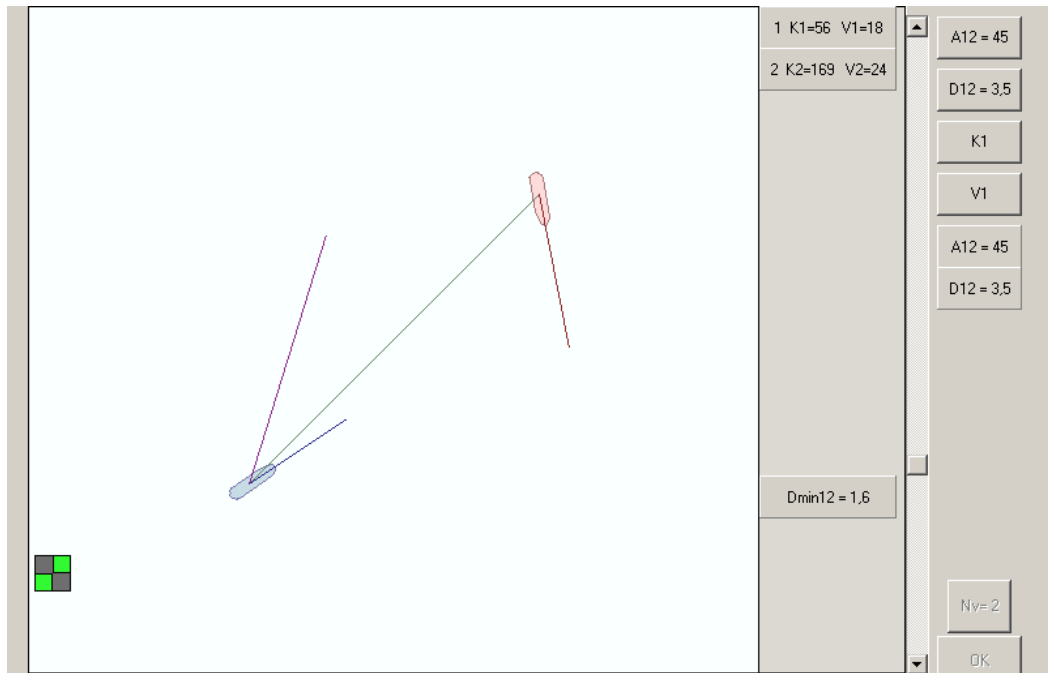


Рис. 3. Безпечне розходження першого і другого суден

Як впливає з рис. 4, перше і третє судна, при курсах ухилення $K_{1y} = 56^\circ$ і $K_{3y} = 347^\circ$, безпечно розходяться, при цьому дистанція найкоротшого зближення рівна 1,39 милі.

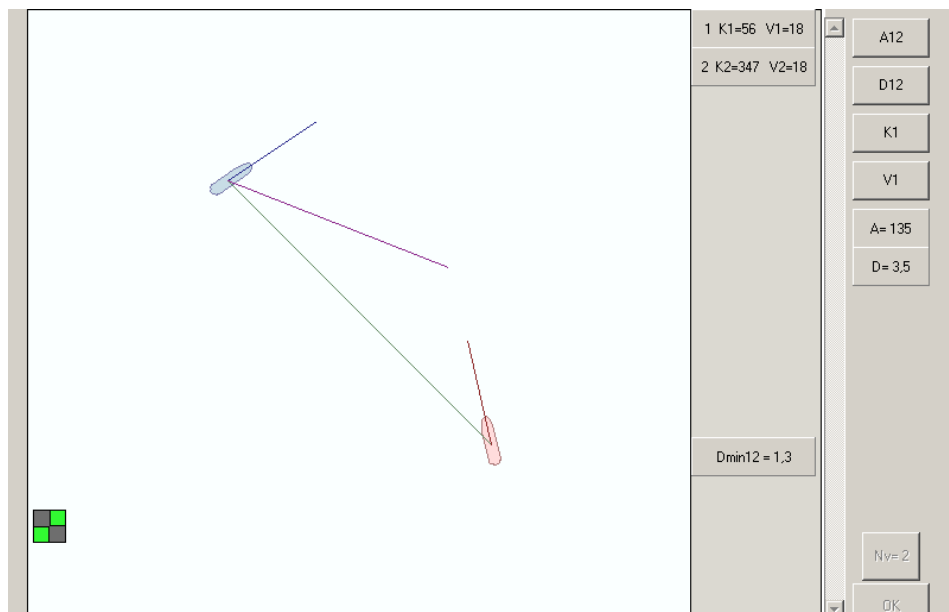


Рис. 4. Безпечне розходження першого і третього суден

На рис. 5 показано, що при проходженні курсами ухилення $K_{2y} = 169^\circ$ і $K_{3y} = 347^\circ$, друге і третє судна безпечно розходяться на дистанції найкоротшого зближення 1,02 милі.



Рис. 5. Безпечне розходження другого і третього суден

В розділі розглянуто другий етап перевірки коректності розрахованої стратегії розходження за допомогою імітаційного моделювання процесу розходження трьох суден розрахованими курсами ухилення $K_{1y} = 56^\circ$, $K_{2y} = 169^\circ$, $K_{3y} = 347^\circ$, яке підтвердило безпечність розходження суден.

Імітаційним моделюванням вибору оптимальної стратегії розходження в ситуації небезпечного зближення чотирьох суден, що підтвердило коректності розрахованої стратегії розходження, завершується п'ятий розділ.

Таким чином, в розділі розроблено метод визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються, та приведено результати його імітаційного моделювання.

Матеріали розділу опубліковано у роботі [8].

ВИСНОВКИ

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

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки нового ефективного методу визначення параметрів стратегії розходження суден, що має

комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням принципу зовнішнього управління розходженням незалежно від наявності СУРС та використанням способу автоматичного сканування для визначення оптимальних курсів ухилення.

У дисертаційній роботі:

– вперше розроблено спосіб оцінки ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден;

– вперше запропоновано процедуру визначення групи суден, що взаємодіють, в ситуації зближення;

одержав подальший розвиток метод визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «Акомарін(Одеса)» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 19.04.2021 р.), Азовським морським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт впровадження від 14.04.2021 р.), та малим приватним підприємством «Трансконтинентальне сейсмопрогнозове бюро» (акт впровадження від 11.05.2021 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Розробка методів безаварійного плавання суден в прибережних районах навігації» (№ ДР 0120U102611, 2021 р.), в якій здобувачу належить виконаний підрозділ.

Під час виконання дисертаційної роботи наступний патент було отримано:

– патент на корисну модель № 143062 «Стенд для дослідження опору руху моделей транспортних засобів». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 10.07.2020, Бюл. № 13.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Берестовой А.М. Блок-схема алгоритма расчета маневра последнего момента / Берестовой А.М., **Янчецкий А.В.**, Черныш А.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С. 218-224.

2. Хуссейн Ю.М. Перспективные способы расхождения судов и анализ их эффективности. / Хуссейн Ю.М., **Янчецкий А.В.** // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – № 1(22). – 2020. – С. 54 – 63.

3. Бурмака И.А. Оценка вероятности степени опасности сближения судов / Бурмака И.А., **Янчецкий А.В.** // Судовождение: Сб. научн. трудов./ НУ «ОМА», Вып. 30. – Одесса: «ИздатИнформ», 2020 - С. 27-34.

4. Бурмака І.О. Визначення групи суден при небезпечному зближенні / Бурмака І.О., Ворохобін І.І., **Янчецький О.В.** // Судноводіння: Зб. наук. праць./ НУ «ОМА», Вип. 31. – Одеса: «ИздатИнформ», 2021 - С. 108-113.

5. Янчецкий А.В. Определение группы взаимодействующих судов при сближении в районе интенсивного движения. / Янчецкий А.В. // East European Science Journal, №1 (65), 2021, part 3. - С. 4 - 8.

6. Янчецкий А.В. Оценка вероятности корректного определения типа взаимодействия судов в ситуации опасного сближения. / Янчецкий А.В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX(31), Issue: 250, 2021.- С. 46 - 49.

7. Янчецкий А.В. Способ оценки эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов/ Янчецкий А.В. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020): Матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2020 – Херсон: ХДМА, 2020. – С. 127–129.

8. Янчецкий А.В. Процедура определения степени опасности ситуации сближения судов. / Янчецкий А.В. //Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 12-13 листоп. 2020 – Одеса : НУ «ОМА», 2020. – С. 101–104.

9. Burmaka I. Methods of Ships' External Steering in Condition of Close Quarters Situation/ I. Burmaka, M. Kulakov, Y. Khussein, **O. Yanchetsky** // Transport Means 2020 Sustainability: Research and Solutions, Proceedings of the 24th International Scientific Conference, part II, September 30 - October 02, 2020, Online Conference - Kaunas, Lithuania, P. 753-757.

АНОТАЦІЯ

Янчецький О.В. Вдосконалення методів попередження зіткнення суден врахуванням ефективності їх маневру розходження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 - Річковий та морський транспорт). - Національний Університет «Одеська морська академія», Одеса, 2021.

В роботі викладено основні етапи процесу ухвалення рішення по попередженню зіткнень суден. Показано, що істотними є чотири етапи. Для зіставлення аналітичних систем попередження зіткнень суден запропонована процедура оцінки їх ефективності, яка визначається вірогідністю безпечного завершення процесу розходження.

Запропоновано оцінку вірогідності ступеня небезпеки зближенні суден, для розрахунку якої одержаний аналітичний вираз щільності розподілу вірогідності похибки дистанції найкоротшого зближення.

Розроблено спосіб оцінки вірогідності коректного визначення типу взаємодії суден і вибору оптимальної стратегії розходження. Показана

перевага зовнішнього управління процесом розходження суден через відсутність необхідності координації їх взаємодії.

Запропоновано процедуру визначення групи взаємодіючих суден для визначення сумісної стратегії розходження з метою компенсації ситуативного збурення.

В роботі розроблені алгоритм і процедура визначення стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються. Для вирішення поставленої задачі запропонований спосіб сканування площин парних курсів суден. Для ситуації небезпечного зближення декількох суден за допомогою одержаного алгоритму була розроблена імітаційна програма визначення оптимальної стратегії розходження.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, зовнішнє управління, стратегія розходження групи суден, імітаційне моделювання.

АННОТАЦІЯ

Янцевий А.В. Усовершенствование методов предупреждения столкновения судов учетом эффективности их маневра расхождения. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.13 – навигация и управление движением (271 - речной и морской транспорт). - Национальный Университет «Одесская морская академия», Одесса, 2021.

В работе изложены основные этапы процесса принятия решения по предупреждению столкновений судов. Показано, что существенными являются четыре этапа. Для сопоставления аналитических систем предупреждения столкновений судов предложена процедура оценки их эффективности, которая определяется вероятностью безопасного завершения процесса расхождения.

Предложена оценка вероятности степени опасности сближения судов, для расчета которой получено аналитическое выражение плотности распределения вероятностей погрешности дистанции кратчайшего сближения.

Разработан способ оценки вероятности корректного определения типа взаимодействия судов и выбора оптимальной стратегии расхождения. Показанное преимущество внешнего управления процессом расхождения судов из-за отсутствия необходимости координации их взаимодействия.

Предложена процедура определения группы взаимодействующих судов для определения совместимой стратегии расхождения с целью компенсации ситуативного возмущения.

В работе разработаны алгоритм и процедура определения стратегии расхождения группы судов, которые опасно сближаются. Для решения

поставленной задачи предложен способ сканирования плоскостей парных курсов судов. Для ситуации опасного сближения нескольких судов с помощью полученного алгоритма была разработана имитационная программа определения оптимальной стратегии расхождения.

Ключевые слова: безопасность судовождения, предупреждение столкновений судов, внешнее управление, стратегия расхождения группы судов, имитационное моделирование.

ANNOTATION

Yanchetskyy A.V. Improvement of methods of warning of collision of vessels by the account of efficiency of their maneuver of divergence. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences (Ph.D.) after specialty 05.22.13 - navigation and traffic control (271 - river and marine transport). It is the National University «Odessa marine academy», Odessa, 2021.

The basic stages of process of decision-making on warning of collisions of vessels are expounded in work. It is shown that four stages are substantial. For comparison of the analytical collision avoidance systems vessels the offered procedure of estimation of their efficiency which is determined by probability of safe completion of process of divergence.

Estimation of probability of degree of danger is offered rapprochement of vessels, for the calculation of which analytical expression of closeness of probability distribution of error of distance of the shortest rapprochement is got.

The method of estimation of probability of correct determination of type of cooperation of vessels and choice of optimum strategy of divergence is developed. Shown advantage of external process control of divergence of vessels for lack of necessity of coordination of their cooperation.

Procedure of determination of group of interactive vessels for determination of compatible strategy of divergence with the purpose of indemnification of situation indignation is offered.

An algorithm and procedure of determination of strategy of divergence of group of vessels which are dangerously drawn together is developed in work. For the decision the set problem the method of scanning of planes of pair courses of vessels is offered. For the situation of dangerous rapprochement of a few vessels by the got algorithm the imitation program of determination of optimum strategy of divergence was developed.

Keywords: safety of navigation, warning of collisions of vessels, external management, strategy of divergence of group of vessels, imitation design.