

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

Жуков Дмитро Сергійович

УДК 656.61.086.16-044.57-049.5(043.3)

**МІНІМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ
НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2025

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: **АСТАЙКІН Дмитро Вадимович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет Одеська морська академія

Офіційні опоненти: **ЖУРАВСЬКА Ірина Миколаївна**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили;

БЕНЬ Андрій Павлович, кандидат технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії.

Захист відбудеться 4 грудня 2025 р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65052, 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://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Реферат розісланий 3 листопада 2025 р.

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



Віталій НІКОЛЬСЬКИЙ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В результаті підвищення безаварійності судноводіння знижується загроза людському життю на морі, можлива шкода довкіллю та майну.

Інтенсивне судноплавство і навігаційні небезпеки ускладнюють плавання суден в стислих водах, що сприяє виникненню аварійних ситуацій. Комплексне відображення аварійних ризиків навігаційної ситуації, яка характеризує положення судна відносно програмної траєкторії руху, навігаційні небезпеки, рухомі цілі, тощо, відбувається у свідомості судноводія, в результаті чого проводиться вибір прийнятого рішення. Це потребує обробки великого обсягу поточної інформації, що іноді перевищує пропускну спроможність судноводія і може привести до можливої аварії.

Це викликає необхідність розробки методів комплексного врахування факторів навігаційних аварій і представлення їх у вигляді зручного сприйняття судноводієм для прийняття безпечних рішень, що є темою даної роботи та являється актуальним і перспективним науковим напрямом

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В процесі дисертаційного дослідження було використано положення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р із змінами, внесеними згідно з постановою КМ України від 28.04.2023 № 416), Указ Президента України № 29 722/2019 «Про Цілі сталого розвитку 1 України на період до 2030 року». Дослідження по темі дисертаційної роботи також проводилися згідно планів наукових досліджень національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Удосконалення методів управління та експлуатації суден» (№ ДР 0123U101463, 2024 р.), в якій здобувачу належить окремий підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється метод синтезу та відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі, який забезпечує комплексне врахування впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння. Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритму формування та відображення навігаційної ситуації.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про можливість підвищення безпеки судноводіння графічним відображенням в судовій навігаційній системі додаткової інформації, яка характеризує навігаційну ситуацію з позицій можливого ризику аварії.

Методами теорії дослідження операцій було проведено декомпозицію головної задачі дисертації на декілька незалежних складових задач:

- 1) формалізація впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;

- 2) аналіз заходів щодо зниження негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;

3) розробка бортової навігаційної інформаційної системи комплексного урахування ризиків навігаційних аварій.

Об'єктом дослідження дисертації є забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах.

Предметом дослідження являються способи зниження негативного впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння.

Методи дослідження. Рішення поставлених в роботі задач було проведено наступними методами:

- системного аналізу при виборі напрямку тематики дисертаційного дослідження та його методологічного забезпечення;
- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дослідження на три незалежні складові задачі;
- теорії вірогідності для розробки способу формування поля точності обсервації судна;
- теоретичної механіки для формування процедури мінімізації бокового зміщення судна після маневру.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в одержанні нового методу формування та відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі, який відрізняється тим, що дозволяє комплексно враховувати вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, забезпечуючи вибір безпечного маршруту судна в обмежених умовах.

У дисертаційній роботі:

- вперше запропоновано метод комплексного врахування ключових ризиків навігаційних аварій, який відрізняється можливістю одночасного урахування навігаційних, технічних та людських факторів, що дозволяє обґрунтовано підвищувати рівень безпеки судноводіння в обмежених умовах;
- вперше розроблено спосіб формування поля точності за кількома орієнтирами, який відрізняється урахуванням просторового розташування та похибок визначення навігаційних орієнтирів, що дозволяє більш надійно оцінювати навігаційне забезпечення маршруту судна;
- вдосконалено процедуру врахування бічного зміщення судна внаслідок маневру, яка відрізняється уточненою методикою розрахунку впливу курсових змін та зовнішніх факторів, що дозволяє підвищити точність прогнозування траєкторії руху;
- отримали подальший розвиток методи відображення навігаційної ситуації з використанням електронної карти, які відрізняються інтеграцією результатів комплексної обробки навігаційної інформації, що дозволяє підвищити інформативність та оперативність прийняття рішень судноводієм.

Практичне значення отриманих результатів визначається можливістю їх упровадження в разі розробки судових навігаційних систем для підвищення точності судноводіння.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені Товариством з обмеженою відповідальністю «А-Технології»

(Акт впровадження від 06.05.2025) та Товариством з обмеженою відповідальністю «Транспортні системи безпеки Україна» (Акт впровадження від 06.05.2025). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні навчальної дисципліни «Попередження зіткнення суден та використання радіолокаційних станцій і засобів автоматизованої радіолокаційної прокладки» (Акт від 14.05.2025).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу здобувач виконав самостійно: ним проведено аналіз літературних джерел по основним напрямкам проблеми забезпечення безпеки судноводіння та проведено методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розроблено метод спільного урахування впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, а також запропоновано метод формування поля точності, створеного декількома орієнтирами та скалярний показник поля та впроваджено результати дослідження у виробництво. В дисертаційній роботі з публікацій у співавторстві використані лише ті положення, які належать автору особисто: спосіб формування поля точності, яке створюється навігаційними орієнтирами [1; 2; 4; 8], процедура визначення допустимої дистанції зближення для домену еліптичної форми [3; 8], спосіб розрахунку моменту часу початку ухилення судна від небезпечної цілі [5], методу вибору оптимального режиму керування судном за несприятливих погодних умов [6; 7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях:

- XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2025» (Херсон, 28–30 травня 2025 р.);
- 16-й Міжнародній науковій конференції «Морська навігація та безпека морських перевезень (TransNav-2025)» (м. Гдиня, Республіка Польща, 11–13 червня 2025 року);
- щорічних Міжнародних конференціях Міжнародної асоціації морських університетів AGA IAMU (2008, 2010, 2016 рр.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 8 наукових праць (з них 2 одноосібно), в тому числі в наукових профільних виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України (кат. Б) – 2 наукові статті; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 2 наукові статті (1 з них індексована у наукометричній базі Scopus); в збірниках матеріалів наукових конференцій – 4 тези доповідей (2 з них індексовані у наукометричній базі Scopus).

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (125 найменувань) і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 200 сторінок, та містить 80 рисунків, зокрема 180 сторінок основного тексту, 14 сторінок списку використаних джерел, 6 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертаційної роботи приведено обґрунтування актуальності теми дисертації, її зв'язок із державними постановами і програмами наукових досліджень університету та

У першому розділі, виходячи з аналізу літературних джерел проведено розгляд головних напрямків проблеми підвищення безпеки судноводіння.

Суттєвий внесок в теорію і практику вирішення проблеми забезпечення безаварійності судноплавства зробили вчені Аксютін Л. Р., Бурмака І. О., Ворохобін І. І., Воробйов Ю. Л., Вагущенко Л. Л., Кондрашихін В. Т., Мальцев А. С., Цимбал М. М., Lisowski J. та інші.

У розділі показано, що одним із основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки плавання суден в стислих водах є підвищення точності судноводіння та запобігання зіткненням суден. Достатній резерв вирішення цих аспектів полягає у зниженні негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння.

У другому розділі проведенню методологічне забезпечення дослідження по темі дисертації та обґрунтовано вибір його теми.

Технологічна карта дисертаційного дослідження сформована методами системного підходу, вона відображає мету, головну задачу дослідження, його робочу гіпотезу, а також визначено об'єкт і предмет дослідження. Використовуючи методи теорії дослідження операцій було розділено головну задачу дисертації на складові незалежні задачі.

У третьому розділі розглянуто ризики навігаційних аварій та їх вплив на безпеку судноводіння. Проаналізовано ризики аварій, які виникають через випадкові похибки вимірювань навігаційних параметрів, що при визначенні місця судна ведуть до появи векторіальної похибки.

Визначення координат судна за надмірних вимірювань методом максимальної правдоподібності дає ефективні оцінки. При цьому другі центральні моменти (дисперсії) та змішані складові коваріаційна матриці набувають мінімуму, тому матриця векторних похибок, отримана цим методом, позначена. Доведено, що при різній точності ліній положення коваріаційна матриця має вигляд:

$$K_{\min} = \frac{1}{\Delta_r} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i & -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \end{vmatrix},$$

де n – число ліній положення;

α_i – напрямок градієнта i -ї лінії положення;

$$\Delta_r = [(\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i)(\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i) - (\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i)^2];$$

$$s_i = \int_R \frac{\left[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f(\xi_i) \right]^2}{f(\xi_i)} d\xi_i.$$

В останньому виразі $f(\xi_i)$ – густина розподілу похибки i -ї лінії положення.

В розділі проаналізовано ризик зіткнення судна з небезпечною ціллю, що характеризується інтенсивністю, величина якої пропорційна вірогідності зіткнення суден. Показано, що ризик зіткнення можна ранжувати цілочисельними значеннями від 0 (відсутність ризику зіткнення $\mathfrak{R}_2$) до деякого максимального значення:

$$\mathfrak{R}_2 = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d; \\ 1, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} > 0; \\ 2, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} \leq 0. \end{cases}$$

де $D_{\min}$, D_d – відповідно дистанції найкоротшого зближення та допустимої; t_{zij} – час запасу.

Розглянуто п'ять типів безпечної області цілі різної форми.

Наведено аналіз впливу маневрування судна на навігаційну безпеку, в частині виникнення лінійного зміщення судна щодо прямолінійної програмної траєкторії руху d_1 , яке має аналітичну залежність наступного виду:

$$d_1 = V_2 \Delta V_N \left\{ \frac{A}{m} (1 - e^{-mt}) - \frac{C}{\omega_d^2 + h^2} [h(e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi) - \sin \psi) + \omega_d (e^{-ht} \cos(\omega_d t + \psi) - \cos \psi)] \right\},$$

де ΔV_N – приріст північної складової швидкості судна, який виникає після маневру;

A , C і ψ – відповідно коефіцієнти інтегрування та початкова фаза, які залежать від початкових умов;

ω_d – частота затухаючих коливань чутливого;

m та h – відповідно аперіодичний член та коефіцієнт загасання.

В результаті повороту судна також виникає систематична векторіальна похибка повороту судна, причиною якої є різниця між реальною траєкторією і прогнозованою, що визначається за моделлю обертального руху судна. Показано, що значення систематичної векторіальної похибки при плаванні в стислих водах є суттєвим, і ризик навігаційних аварій, який виникає в зв'язку з поворотом судна, необхідно враховувати.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1; 7; 8].

Четвертий розділ присвячений заходам щодо зниженню негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння.

Розглянуто можливість зниження впливу ризику навігаційних аварій, який виникає від похибок навігаційних вимірювань, на безпеку судноводіння.

З розвитком інформаційних комп'ютерних технологій синтез навігаційної ситуації дедалі більше покладався на технічні засоби. Поява ЕКНІС, супутникових навігаційних систем, АІС та застосування ЗАРП дали змогу провести формування та відображення інтегрованої навігаційної ситуації, показаної на електронній карті, на якій проводиться індикація поточного положення судна, позиції та значення курсів і швидкостей навколишніх цілей як від ЗАРП, так і від АІС. Таке представлення навігаційної ситуації значно полегшує судноводію забезпечити безаварійне плавання судна.

Слід зазначити, що таке відображення поточної навігаційної ситуації являється неповним. Суттєвим фактором, який має вплив на безпеку судноводіння є характеристики точності визначення місця судна по навігаційним орієнтирам., що особливо стосується районів з ненадійним прийомом сигналу супутникових навігаційних систем,

В зв'язку з цим модель формування навігаційної ситуації слід доповнити візуальним відображенням точності визначення позиції судна в районі його знаходження, для оперативної коректури програмної траєкторії руху з метою підвищення точності визначення місця та вибору найбільш сприятливих умов, які мінімізують вплив позиційних похибок обсервацій судна. Тому для кожної елементарної площини в районі його плавання необхідно розрахувати точність характеристики векторної похибки щодо центру елементарної площини для різних поєднань орієнтирів з індикацією оцінки точності визначення координат судна.

Для візуалізації запропонованого поля точності обсервацій судна можливе використання колірного представлення значень критерію точності, яке слід накласти у прозорому режимі на електронну карту. Таким чином до моделі навігаційної ситуації додається візуальна інформація про точність контролю місця судна.

Формування поля точності обсервації судна потребує вибору чисельного (скалярного) показника,

Кожен із орієнтирів забезпечує можливість отримання двох ліній положення (вимірюванням пеленгу та дистанції). У цьому випадку вирази для дисперсій D_x і D_y коваріаційної матриці мають такий вигляд:

$$D_x = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi}];$$

$$D_y = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi}],$$

де

$$\tilde{\Delta}_r = \left[\left(\sum_{i=1}^N s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi} \right) \left(\sum_{i=1}^N s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi} \right) - \left[\sum_{i=1}^N (s_{Di} + s_{Pi}) \sin \alpha_{bi} \cos \alpha_{bi} \right]^2 \right];$$

$$s_{Di} = \int_{R1} \frac{[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Di}(\xi_i)]^2}{f_{Di}(\xi_i)} d\xi_i; \quad s_{Pi} = \int_{R1} \frac{[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Pi}(\xi_i)]^2}{f_{Pi}(\xi_i)} d\xi_i,$$

причому $f_{Di}(\xi_i)$ і $f_{Pi}(\xi_i)$ – щільність розподілу похибок ліній положення відповідно по виміряним дистанціям та пеленгу.

Для формування поля точності обсервації судна, що виникає при використанні декількох орієнтирів, як зазначалося раніше, потребує застосування скалярної міри точності кожної з можливих позицій прибережного району плавання судна. Встановлено, що найбільш підходящою такою мірою точності є дисперсія модуля векторіальної похибки, яка в разі

вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтира і розподілу похибок ліній положення за нормальним законом, має вигляд:

$$D_{md} = \frac{\sum_{j=1}^N (\frac{1}{\sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pj}^2})}{\frac{1}{2} \{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [(\frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Pj}^2}) \sin^2 \beta_{ij} + (\frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Pj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Dj}^2}) \cos^2 \beta_{ij}] \}}.$$

де N – число орієнтирів;

β_{ij} – горизонтальний кут між i -м та j -м орієнтирами.

З метою використання способу формування поля точності обсервації судна в районі його можливого знаходження проводилось імітаційне комп'ютерне моделювання, яке передбачало відображення поля точності обсервації судна, що створюється декількома орієнтирами, на вибраній електронній карті.

Спочатку відобразимо поле точності обсервації судна, яке виникає при використанні одного орієнтира, тобто по пеленгу і дистанції. У цьому випадку показник точності виражається наступним чином:

$$D_{md1} = \sigma_D^2 + \sigma_P^2.$$

Поле точності обсервації судна, яке виникає при використанні одного орієнтира, відображено на рис. 1, а його оцифрування показано на рис. 2. Для розрахунку величини скалярного показника точності вибирались значення $\sigma_D = 20$ м і $\sigma_P = 0,5^\circ D$.

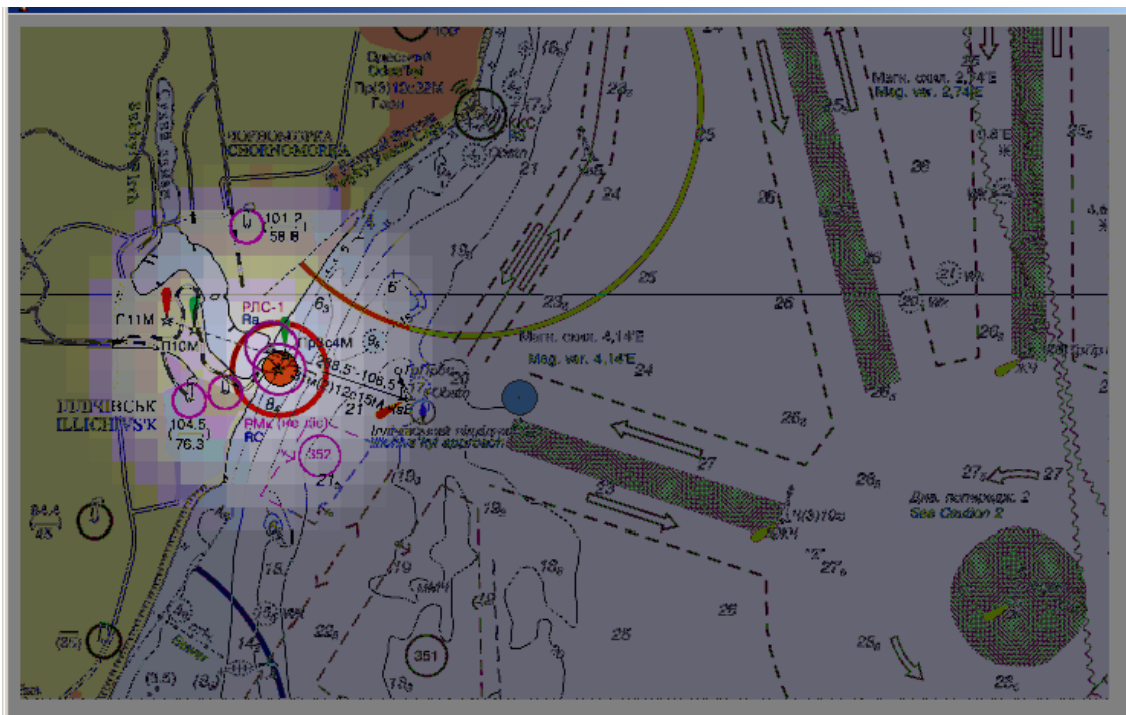


Рисунок 1 – Відображення поля точності для одного орієнтира

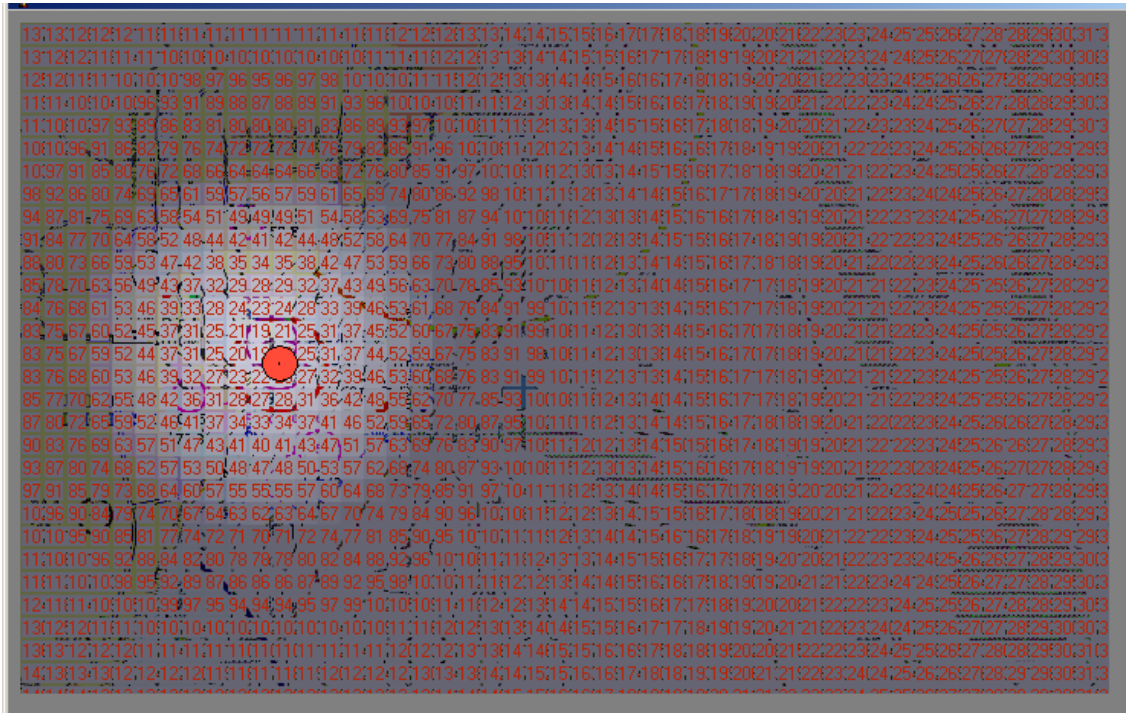


Рисунок 2 – Оцифрування поля точності обсервацій судна для одного орієнтира

Аналіз точності сформованого поля точності одного орієнтира показує, що мінімальна дисперсія модуля траєкторної похибки у районі входу до порту становить 27 м².

Для поля точності, яке виникає при використанні двох орієнтирів тобто по двох пеленгах і двох дистанцій, використовується показник точності для кожної точки на околиці судна, що виражається формулою:

$$D_{md2} = \frac{\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2}}{\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2 \sigma_{P2}^2} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D2}^2} - \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P2}^2} \right) \sin^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{P2}^2} - \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{D2}^2} \right) \cos^2 \beta_{12}}.$$

За даним виразом розраховувався показник, величина якого визначає ступінь затінювання кожної елементарної ділянки та індикацію відповідного йому чисельного значення скалярного показника точності, як показано на рис. 3 та рис. 4.

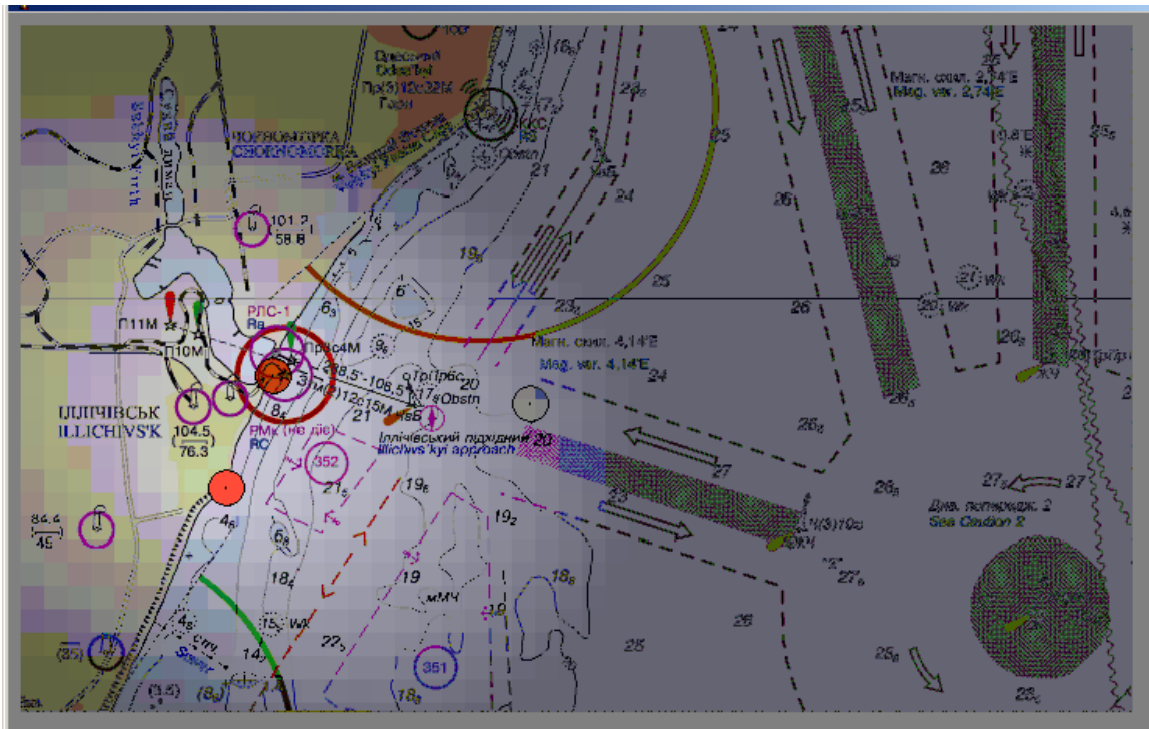


Рисунок 3 – Відображення поля точності для двох орієнтирів

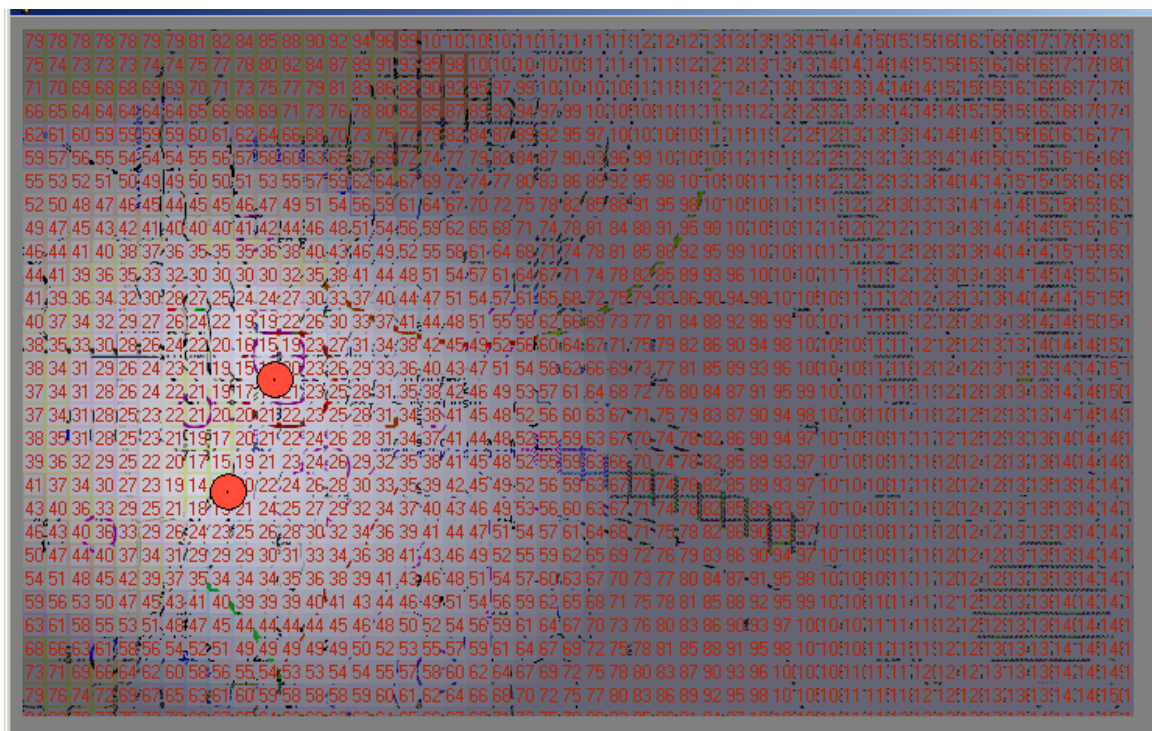


Рисунок 4 – Оцифрування поля точності для двох орієнтирів

Аналіз точності сформованого поля, що породжується двома орієнтирами, показує, що мінімальна дисперсія модуля траєкторної похибки в районі входу до порту становить 22 м^2 , а на відстані до 8 миль дисперсія не гірша за 70 м^2 .

У випадку, коли визначення місця судна проводиться за допомогою трьох орієнтирів, то показник точності D_{md3} розрахований для будь-якої можливої позиції судна в районі його плавання обчислюється за таким аналітичним виразом:

$$D_{md3} = \frac{\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2} + \frac{1}{\sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P3}^2}}{S+C},$$

де величини S та C визначаються з наступних формул:

$$S = \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P2}^2} \right) \sin^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P3}^2} \right) \sin^2 \beta_{13} +$$

$$+ \left(\frac{1}{\sigma_{D2}^2 \sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2 \sigma_{P3}^2} \right) \sin^2 \beta_{23};$$

$$C = \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P2}^2} \right) \cos^2 \beta_{12} + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P3}^2} \right) \cos^2 \beta_{13} + \left(\frac{1}{\sigma_{D2}^2 \sigma_{D3}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2 \sigma_{P3}^2} \right) \cos^2 \beta_{23}.$$

За допомогою даного виразу розраховувався показник D_{md3} , причому відображення поля точності показано на рис. 5 а індикація чисельного значення скалярного показника точності представлена на рис. 6.



Рисунок 5 – Відображення поля точності для трьох орієнтирів

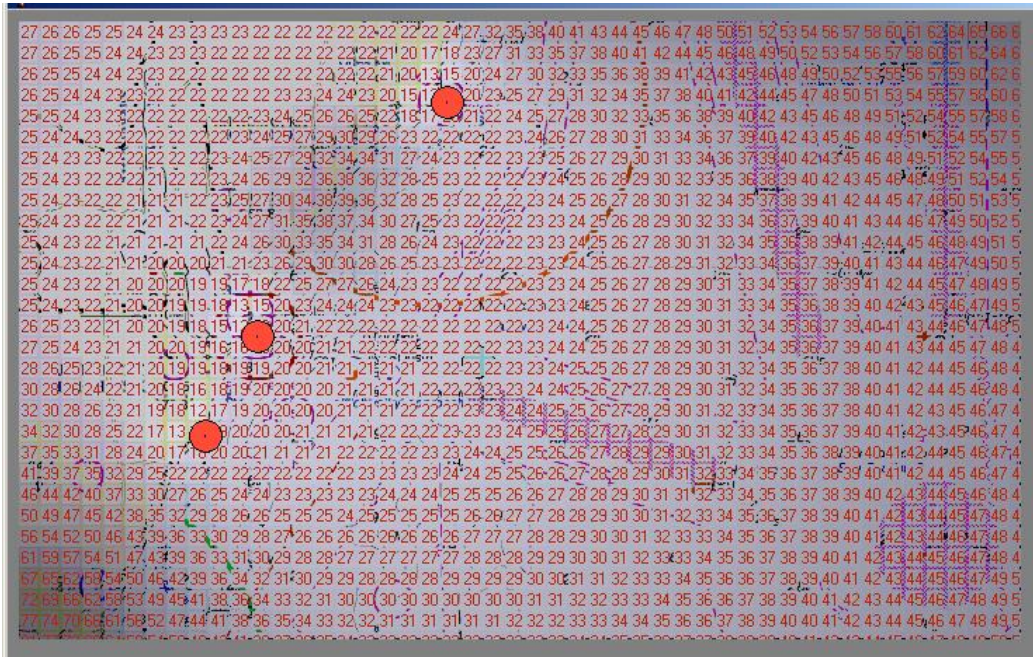


Рисунок 6 – Оцифрування поля точності для трьох орієнтирів

Аналіз точності сформованого поля, що породжується трьома орієнтирами, показує, що мінімальна дисперсія модуля векторіальної похибки для району модуля траєкторної похибки в районі входу до порту становить 13 м^2 , а на відстані до 8 миль дисперсія не гірша за 40 м^2 .

Ризик зіткнення можливо компенсувати, якщо визначити сектор небезпечних курсів, які викликають загрозу зіткнення, і курс ухилення вибирати із значень, що не належать до сектору небезпечних курсів. Сектор небезпечних курсів визначається безпечною зоною D_b .

Для безпечного розходження судна з ціллю в ситуації можливого зіткнення з урахуванням форми безпечної зони (домену) судно повинне вибрати граничний відносний курс, який є дотичним до безпечної зони.

Розглянуто аналітичні вирази граничних відносних курсів ухилення для доменів прямокутної та еліптичної форми, причому для домену еліптичної форми наведено вирази розрахунку граничних відносних курсів ухилення, які визначаються наступним чином:

$$K_{ot}^S = \max\{\bar{K}_{ymin1}; \bar{K}_{ymin2}; \bar{K}_{ymin3}; \bar{K}_{ymin4}\};$$

$$K_{ot}^P = \min\{\bar{K}_{ymin1}; \bar{K}_{ymin2}; \bar{K}_{ymin3}; \bar{K}_{ymin4}\}.$$

В останньому виразі:

$$\bar{K}_{ymin1,2} = \arctg \frac{\bar{X}_0 \pm b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_0 \pm b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c};$$

$$\bar{K}_{ymin3,4} = \arctg \frac{\bar{X}_0 \pm b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_0 \pm b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

де a і b півосі еліпсу; K_c – курс судна; $\bar{X}_o$ та $\bar{Y}_o$ – координати центру еліпсу відносно судна;

$$x_{1,2} = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} \pm \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

причому $c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c)}$ і $r = (\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c)$.

Ризик навігаційних аварій через появу бокового лінійного зміщення, який виникає внаслідок маневру судна, може бути суттєво знижений використанням запропонованої процедури введенням додаткової поправки курсу.

Враховуючи, що знак бічного зсуву після маневру судна змінює свою величину і знак, для його компенсації необхідно додаткову поправку курсу змінити по величині і знаку кілька разів протягом інтервалу часу, при якому бічний зсув досягає першого і другого максимального значення. Поправка курсу $\Delta K_i(t)$ визначається виразом:

$$\begin{aligned} \Delta K_i(t) &= -57,3 \times \arctg\left(\frac{d_{\max 1}}{0,513 V_c t_1}\right), \text{ якщо } t \in [0; t_1]; \\ \Delta K_i(t) &= 57,3 \times \arctg\left[\frac{d_{\max 1}}{0,513 V_c (t_2 - t_1)}\right], \text{ якщо } t \in [t_1; t_2]; \\ \Delta K_i(t) &= -57,3 \times \arctg\left[\frac{d_{\max 2}}{0,513 V_c (t_3 - t_2)}\right], \text{ якщо } t \in [t_2; t_3]; \\ \Delta K_i(t) &= 57,3 \times \arctg\left[\frac{d_{\max 2}}{0,513 V_c (t_4 - t_3)}\right], \text{ якщо } t \in [t_3; t_4], \end{aligned}$$

де t_1, t_3 – моменти часу настання максимальних значень бокового зміщення;
 t_2, t_4 – моменти часу нульових значень бокового зміщення.

Після моменту часу t_4 додаткова поправка до курсу не враховується, тобто $\Delta K_i(t)=0$.

Для реалізації запропонованої процедури зниження бічного зсуву судна після маневру необхідно за допомогою комп'ютера побудувати криву залежності бічного зсуву від часу після закінчення маневру. Потім з кривою зняти значення першого $d_{\max 1}$ і другого $d_{\max 2}$ максимального зсуву, а також моменти часу t_1, t_3 максимального значення бічного зсуву і моменти часу t_2, t_4 перетворення бічного зсуву в нуль.

В розділі розглянуто питання мінімізації систематичної векторіальної похибки, що виникає при повороті судна. З метою вибору адекватної моделі обертального руху повороту було проведено імітаційне моделювання траєкторій повороту з використанням експериментального матеріалу, який був отриманий в реальних умовах плавання судна, і був використаний для розрахунку інерційних характеристик суден.

Було встановлено, що найбільш прийнятною є математична модель поворотності судна третього типу, так як при достатній простоті вона має

необхідну точність (максимальна розбіжність експериментальної та модельної траєкторій 25–30 м).

Тому для мінімізації систематичної векторіальної похибки, що виникає в результаті повороту судна, необхідно для прогнозу траєкторії повороту судна використовувати третю динамічну модель поворотності судна.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1; 2; 6; 8].

Розділ 5 присвячений комплексному урахуванню впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій розробкою судової інформаційної системи. Наведено алгоритм формування та відображення поточної навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі.

У розділі представлено аналітичні вирази, які використовуються у алгоритмі формування та відображення поточної навігаційної ситуації. Приведені формули для розрахунку показника точності в кожній можливій позиції судна в районі його плавання, враховуючи число та розташування вибраних орієнтирів, їхнього геометричного фактору та точності вимірюваних навігаційних параметрів.

Наведено вирази для оцінки ширини смуги лінійного зміщення судна щодо програмної траєкторії плавання, що виникає після його маневру. Приведено вирази для визначення моментів часу першого і другого максимальних зміщень, а також формули для розрахунку їх величини. Аналітичні вирази наведені для гірокомпаса з твердим маятником і для корегованого гірокомпаса з непрямим керуванням.

Викладено аналітичні вирази щодо визначення сектора неприпустимих як відносних, так і істинних курсів судна, які не дозволяють розійтися з ціллю на дистанції, що перевищує допустиме значення дистанції найкоротшого зближення.

В розділі наведено опис імітаційної моделі, що дозволяє відображати на електронній карті навігаційну ситуацію, причому при імітаційному моделюванні надається можливість використання однієї з трьох електронних карт, в якості яких обрано підходи до портів Севастополь, Чорноморськ та Феодосія. На електронній карті вибираються позиції судна та однієї цілі. Передбачена можливість вибору безпечного маршруту руху судна, враховуючи візуалізацію значень параметрів навігаційної ситуації. Імітаційна модель дозволяє проводити програвання обраного маршруту проходження з реєстрацією значень показника точності поля.

На електронній карті проводиться вибір орієнтирів, після чого проводиться відображення поля в режимі кольору без оцифрування. На рис. 7 показано поле точності для трьох вибраних орієнтирів, які позначені на електронній карті колами червоного кольору.

Після відображення поля точності можливо виявити сектор недозволених курсів судна, які ведуть до дистанції найкоротшого зближення судна з ціллю менше її допустимого значення. На рис. 8 показаний такий сектор недозволених курсів судна укладений між граничними курсами приблизно 250° та 310° . Сектор забарвлений у червоний колір змінної інтенсивності – чим

більша дистанція найкоротшого зближення, то світліший червоний колір. Для даного випадку дистанція і час найкоротшого зближення рівні відповідно 0,42 милі та 13,8 хвилини.

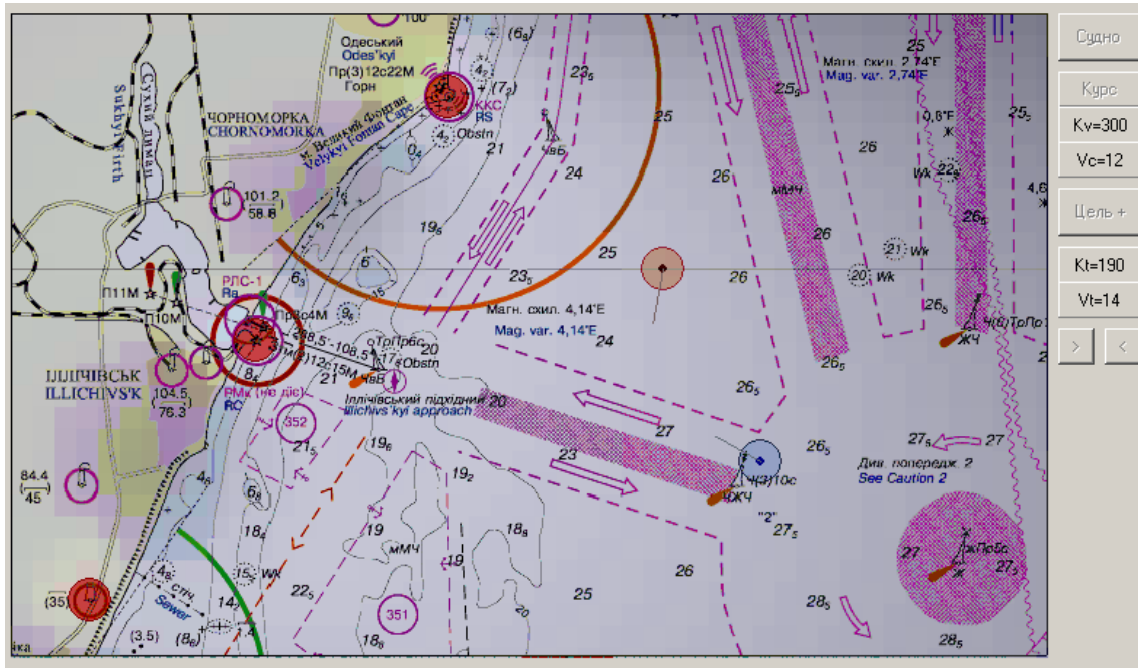


Рисунок 7 – Відображення поля точності без оцифрування

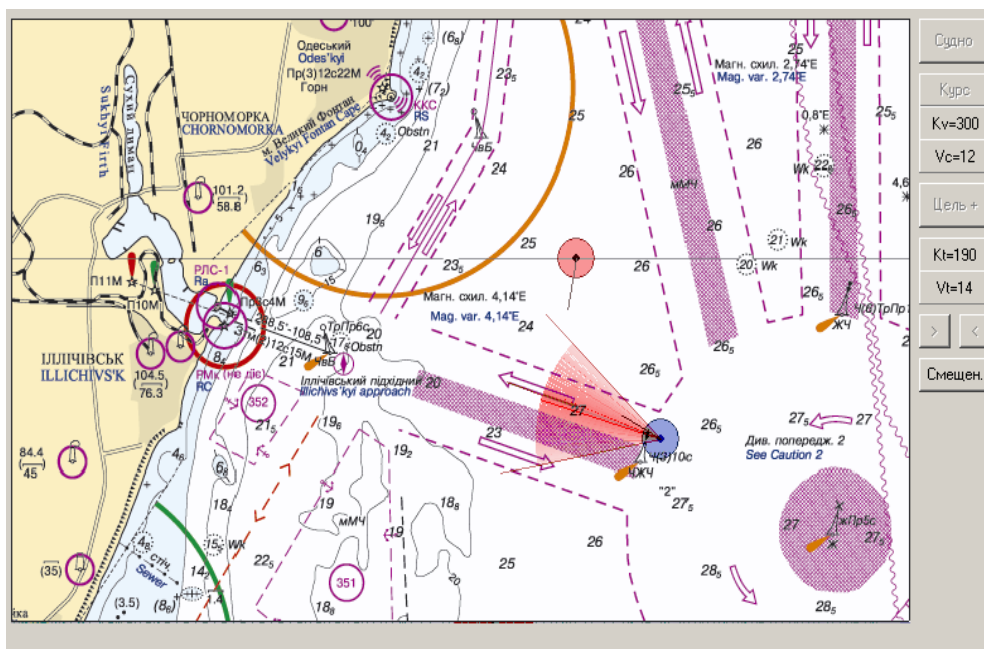


Рисунок 8 – Формування сектора небезпечних курсів судна

На рис. 9 показано смугу лінійного зміщення судна у збільшеному фрагменті. Вихідна ділянка електронної карти, яка збільшується, забарвлюється блакитним фоновим кольором (див. рис. 9). Збільшена ділянка виводиться на жовтому фоні, показано смугу лінійного усунення симетрично

щодо позиції судна. На збільшеній ділянці електронної карти щодо початкової позиції судна побудовано його безпечну зону, яка враховує інерційні характеристики. Формою судової безпечної зони обрано еліпс зі зміщеним центром, що збігається з центром мас судна.

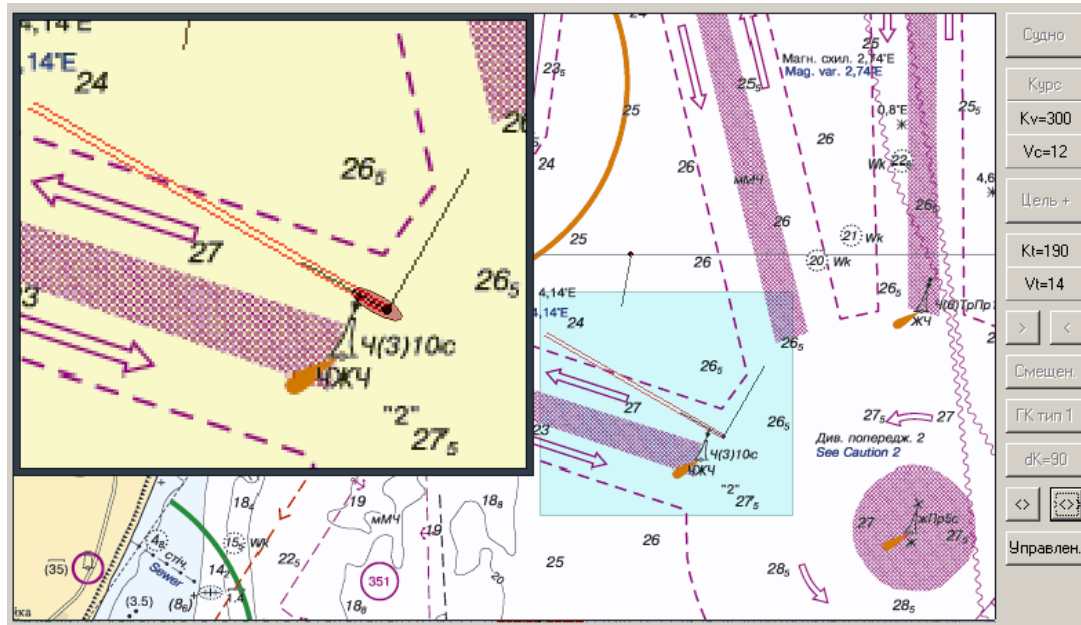


Рисунок 9 – Відображення смуги лінійного усунення судна

Для імітації зміни курсу судна використовуються клавіші «>» і «<», причому змінюється не тільки напрямок передбачуваного руху судна, а також межі смуги усунення судна (забарвлені жовтим кольором), що відображено на рис. 10.

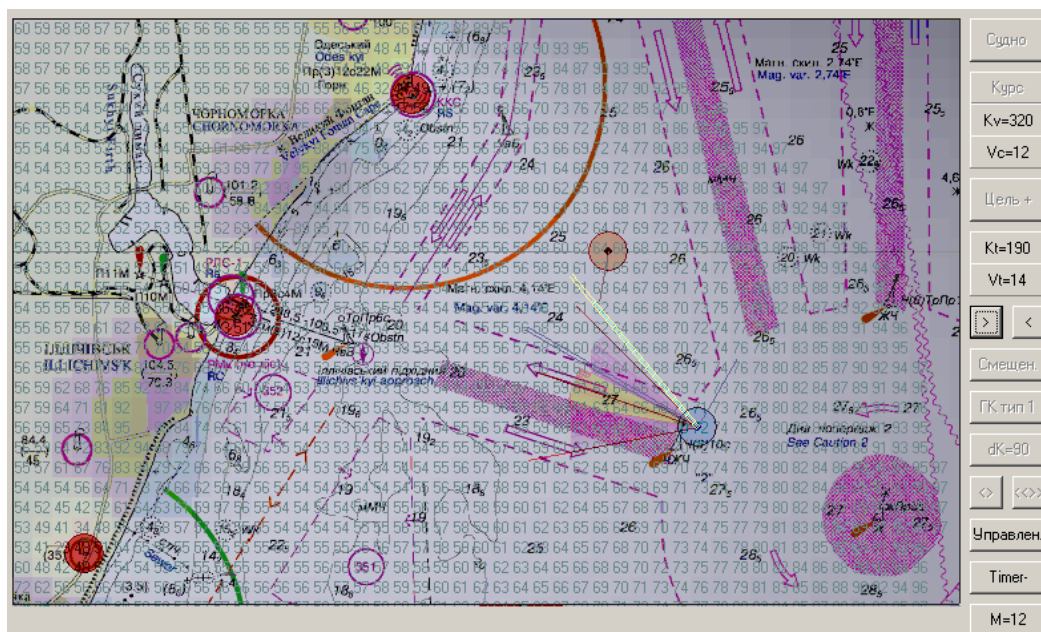


Рисунок 10 – Відображення безпечної траєкторії руху судна

На рис. 10 вибрано граничний безпечний курс поворотом праворуч на 320° , що показано на інформаційній панелі. При цьому курсі траєкторія судна проходить по ділянці поля точності з хорошими характеристиками та безпечно щодо цілі.

Програванням маневру ухилення переконаємося у безпечному розходженні (див. рис. 11).

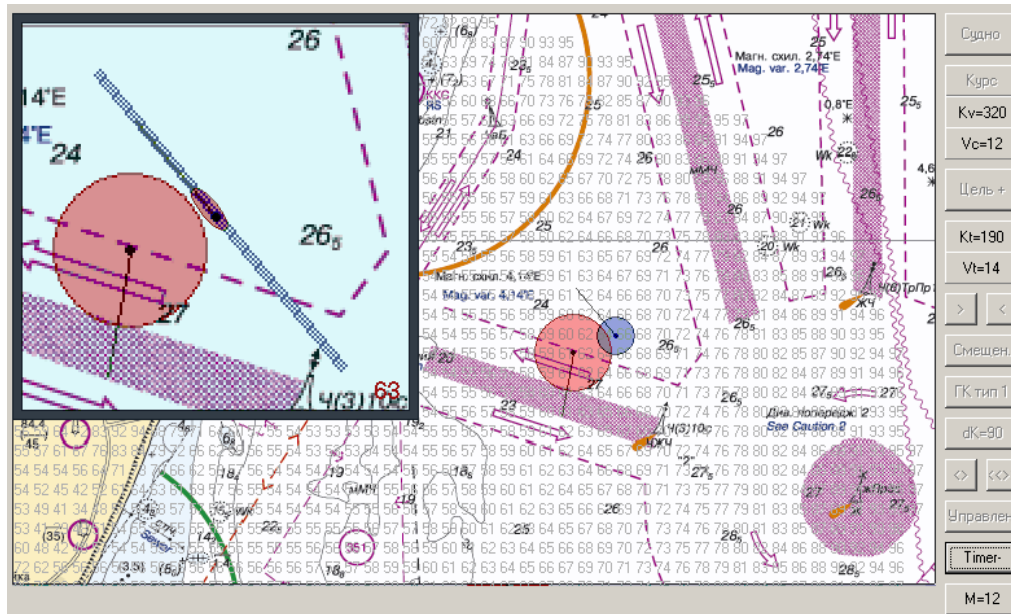


Рисунок 11 – Ілюстрація програвання маневру ухилення

В розділі також розглянуто ризики плавання судна в штормових умовах та можливості зниження їх впливу на безпеку судноводіння, які можуть бути реалізовані в судновій інформаційній системі.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [1; 4; 5; 8].

ВИСНОВКИ

Плавання суден в стислих районах ускладнено інтенсивним судноплаством і навігаційними перешкодами, що створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій.

Комплексне відображення аварійних ризиків навігаційної ситуації, яка характеризує положення судна відносно програмної траєкторії руху, навігаційні небезпеки, рухомі цілі, тощо, відбувається у свідомості судноводія, в результаті чого проводиться вибір прийнятого рішення. Це потребує обробки великого обсягу поточної інформації, що іноді перевищує пропускну спроможність судноводія і може привести до можливої аварії.

Це викликає необхідність розробки методів комплексного врахування факторів навігаційних аварій і представлення їх у вигляді зручного сприйняття судноводієм для прийняття безпечних рішень, що є темою даної роботи та являється актуальним і перспективним науковим напрямом.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі

забезпечення безаварійності судноводіння розробкою нового методу формування та відображення поточної навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі, який відрізняється тим, що дозволяє комплексно враховувати вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, забезпечуючи вибір безпечного маршруту судна в обмежених умовах.

У дисертаційній роботі:

- вперше запропоновано метод комплексного врахування ключових ризиків навігаційних аварій, який відрізняється можливістю одночасного урахування навігаційних, технічних та людських факторів, що дозволяє обґрунтовано підвищувати рівень безпеки судноводіння в обмежених умовах;

- вперше розроблено спосіб формування поля точності за кількома орієнтирами, який відрізняється урахуванням просторового розташування та похибок визначення навігаційних орієнтирів, що дозволяє більш надійно оцінювати навігаційне забезпечення маршруту судна;

- вдосконалено процедуру врахування бічного зміщення судна внаслідок маневру, яка відрізняється уточненою методикою розрахунку впливу курсових змін та зовнішніх факторів, що дозволяє підвищити точність прогнозування траєкторії руху;

- отримали подальший розвиток методи відображення навігаційної ситуації з використанням електронної карти, які відрізняються інтеграцією результатів комплексної обробки навігаційної інформації, що дозволяє підвищити інформативність та оперативність прийняття рішень судноводієм.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені Товариством з обмеженою відповідальністю «А-Технології» (Акт впровадження від 06.05.2025) та Товариством з обмеженою відповідальністю «Транспортні системи безпеки Україна» (Акт впровадження від 06.05.2025). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні навчальної дисципліни «Попередження зіткнення суден та використання радіолокаційних станцій і засобів автоматизованої радіолокаційної прокладки» (Акт від 14.05.2025).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жуков Д. С. Комплексне врахування небезпечних чинників для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах. *Судноводіння*, 2025. Вип. 37, С. 78–91. DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.78-91.

2. Жуков Д. С., Алексейчук Б. М. Формування поля точності обсервації судна за декількома орієнтирами. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. Вип. 1 (30). С. 69–79. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.069-079.

3. Burmaka I., Zhukov D. Dependence of the maximum-permissible distance of ships' convergence on the shape of the ship's safe domain. *The TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2025. Vol. 19. P. 265–268. DOI: 10.12716/1001.19.01.31.

4. Жуков Д. С., Алексєйчук Б. М. Вибір скалярного показника для характеристики поля точності вибраних навігаційних орієнтирів. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (MINTT-2025)*, Херсон, Україна, 28–30 травня 2025 р. С. 148–151. URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2025/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%9C%D0%86%D0%9D%D0%A2%D0%A2-2025-%D1%80..pdf> (дата звернення: 07.09.2025).

5. Zhukov D. S. Research on accuracy increase of the process of avoidance of the vessels collision in congested waters. *Proceedings of the 17th Annual General Assembly of the International Association of Maritime University (AGA IAMU)*, Haiphong, Vietnam, 26–29 October 2016. P. 188–193. URL: https://khcn.vimaru.edu.vn/sites/khcn.vimaru.edu.vn/files/iamu_aga_2016s_proceeding_full-final.pdf (Last accessed: 07.09.2025).

6. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Ship control optimization in heavy weather conditions. *Proceedings of the 11th Annual General Assembly International Association of Maritime Universities (AGA IAMU)*, Busan, Republic of Korea, 2010. P. 77–82. URL: <https://iamu-edu.org/archive/proceedings-iamuc/> (Last accessed: 07.09.2025).

7. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. On risk assessment and decision-making while controlling the ship in adverse weather conditions. *Proceedings of the 9th Annual General Assembly International Association of Maritime Universities (AGA IAMU)*, California Maritime Academy, San Francisco, CA, 2008. P. 208–214. URL: <https://iamu-edu.org/archive/proceedings-iamuc/> (Last accessed: 07.09.2025).

8. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Development of the ship model on the basis of an artificial neural network. *IAMU Journal*. 2007. Vol. 5, No.1. P. 23–31.

АНОТАЦІЯ

Жуков Д. С. Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння. – 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 – Морський та внутрішній водний транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2025.

В дисертаційному дослідженні розглянуто ризики навігаційних аварій та їх вплив на безпеку судноводіння, а також доцільність їх врахування.

Показано, що через похибки навігаційних вимірювань виникають ризики аварій, які створюють невизначеність у положенні судна відносно підводних перешкод і сприяють можливості зіткнення судна з ними. Детально розглянуто випадкові похибки та їх стохастичні характеристики.

Розглянуто ризики загрози зіткнення судна із зустрічною ціллю, відносно положення і параметри руху якої з урахуванням інших факторів визначають рівень ризику загрози зіткнення. Наведено поняття безпечної області судна та можливі її форми. Наведені параметри, які характеризують кожну із розглянутих форм безпечної області судна.

Маневрування судна також впливає на навігаційну безпеку через те, що у вихідній інформації про курс судна міститься сумарна інерційна похибка. При управлінні судном наявність такої похибки у показаннях гірокомпасу викликає лінійне зміщення судна щодо прямолінійної програмної траєкторії руху, що породжує ризик навігаційної аварії при плаванні судна поблизу мілин. Описано механізм виникнення сумарної інерційної похибки і появи лінійного зміщення судна відносно прямолінійної траєкторії руху при маневруванні судна. Наведено аналітичні вирази для визначення сумарної інерційної похибки та лінійного бокового зміщення судна.

Розглянуто заходи щодо зниженню негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій. Показано, що урахування похибок навігаційних вимірювань можливе шляхом формування поля точності, яке створюється навігаційними орієнтирами. Для характеристики поля точності запропоновано скалярний показник.

Компенсація ризику можливого зіткнення передбачає в ситуації небезпечного зближення судна з ціллю визначення сектору небезпечних курсів ухилення, величина якого залежить від форми судової безпечної області.

Для зниження бокового зміщення судна відносно програмної траєкторії руху, яке виникає після його маневру, запропоновано два способи управління судном, при застосуванні яких зміщення значно зменшується або зовсім зникає.

Мінімізація систематичної похибки повороту судна. досягається у разі вибору відповідної моделі обертального руху судна для прогнозу траєкторії його повороту.

Наведені результати імітаційного моделювання для трьох районів плавання, при якому задавалися навігаційні ситуації та графічне відображення їх параметрів, яким вибиралися безпечні маршрути подальшого прямування судна.

Також розглянуто ризики плавання судна в штормових умовах та можливості зниження їх впливу на безпеку судноводіння, які можуть бути реалізовані в судовій інформаційній системі.

Ключові слова: безпека судноводіння, ризики навігаційних аварій, поле точності, суднова навігаційна інформаційна система, імітаційне моделювання.

ANNOTATION

Zhukov D. S. Minimizing the impact of navigational accident risks on navigation safety. It is Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in the specialty 05.22.13 – Navigation and Traffic Control (271 – Maritime and Inland Water Transport). National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, 2025.

The dissertation study examines the risks of navigational accidents and their impact on navigation safety, as well as the feasibility of taking them into account.

It is shown that errors in navigational measurements cause risks of accidents, which create uncertainty in the position of the vessel relative to underwater obstacles and contribute to the possibility of a collision of the vessel with them. Random errors and their stochastic characteristics are considered in detail.

The risks of a collision threat between a vessel and an oncoming target are considered, the relative position and parameters of which, taking into account other factors, determine the level of risk of a collision threat. The concept of a safe area of a vessel and its possible forms are given. The parameters that characterize each of the considered forms of a safe area of a vessel are given.

Maneuvering of the vessel also affects navigational safety due to the fact that the initial information about the vessel's course contains a total inertial error. When controlling a vessel, the presence of such an error in the gyrocompass readings causes a linear displacement of the vessel relative to the rectilinear program trajectory of movement, which creates the risk of a navigation accident when the vessel is sailing near shallows. The mechanism of the occurrence of the total inertial error and the appearance of a linear displacement of the vessel relative to the rectilinear trajectory of movement during vessel maneuvering is described. Analytical expressions for determining the total inertial error and linear lateral displacement of the vessel are given.

Measures to reduce the negative consequences of the impact of significant risks of navigational accidents are considered. It is shown that taking into account errors in navigational measurements is possible by forming an accuracy field created by navigational landmarks. A scalar indicator is proposed to characterize the accuracy field.

Compensation for the risk of a possible collision involves, in a situation of dangerous convergence of a vessel, determining the sector of dangerous courses of deviation, the value of which depends on the shape of the vessel's safe area.

To reduce the lateral displacement of the vessel relative to the program trajectory of movement, which occurs after its maneuver, two methods of vessel control are proposed, when using which the displacement is significantly reduced or disappears altogether.

Minimization of the systematic error of the vessel's turn. is achieved when choosing an appropriate model of the vessel's rotational motion to predict the trajectory of its turn.

The results of simulation modeling for three navigation areas are presented, in which navigation situations and a graphical representation of their parameters were specified, by which safe routes for the vessel's further movement were selected.

The risks of vessel navigation in stormy conditions and the possibilities of reducing their impact on navigation safety, which can be implemented in the ship's information system, are also considered.

Keywords: navigation safety, navigation accident risks, accuracy field, ship's navigation information system, simulation modeling.

Підп. до друку 24.10.2025.
Формат 60×84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.
Тираж 100 пр. Зам. № И25-10-34

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