

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

**Ворохобін Ігор Ігорович**



УДК 656.61.052

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ  
НАДІЙНОСТІ СУДНОВОДІННЯ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий консультант:** **Вагущенко Леонід Леонідович,**  
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних комплексів судноводіння Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса

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

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

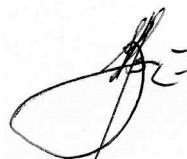
**Федорович Олег Євгенович,**  
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук і інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету ім. М. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться 24 березня 2021 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зала засідань Вченої ради.

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

Автореферат розісланий 23 лютого 2021 р.

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



Нікольський В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Визначальною характеристикою торгового мореплавства є його безпека, оскільки більша половина всіх вантажів світового ринку транспортується морем і річковими водними шляхами.

Через збільшення розмірів і зростання швидкостей сучасних суден та підвищення інтенсивності їхнього руху проблема забезпечення безаварійного судноводіння під час плавання в стислих прибережних районах і зараз є однією з найбільш актуальних.

Втрати світового флоту через аварії за кілька останніх десятиріч склали 1,4% від її загальної кількості, причому в прибережних стислих водах виникає три чверті посадок на мілину та зіткнень суден.

Аварії через посадки на мілину складають 20% від загальної кількості аварій. Вони виникають з причини позиційної похибки контролю місця судна, зокрема у визначенні обмеженої точності місця судна, а також через траєкторні похибки управління, обумовлені недостатнім урахуванням динаміки судна під час його поворотів.

Під стислими водами розуміють райони, де ширина вільного проходу для суден обмежена стосовно навігаційних небезпек, навігаційними умовами або інтенсивним судноплаством. Маневрування судна в обмежених рухом водах утруднено й плавання проводиться за єдино безпечними спеціальними фарватерами або рекомендованими курсами.

Стислим водам притаманні відносно малі дистанції виявлення цілей, швидка зміна ситуацій, гострий дефіцит часу на прийняття рішень щодо маневрування, а також дуже малий запас часу й простору для реакції на несподіваний або неправильний маневр цілі, для корегування власного невіддаленого маневру, для дій при відмові судових технічних засобів.

Це, звичайно, свідчить про велику складність умов плавання в стислих водах. З іншого боку ці факти також можуть розглядатися і як недостатня досконалість методів судноводіння, вживаних в стислих водах, їх велику залежність від особистих і професійних якостей судноводіїв. І тому будь-яке поліпшення або вдосконалення цих методів веде до підвищення безпеки мореплавства, зокрема до зменшення вірогідності людських жертв, екологічних катастроф та економічних втрат, що виникають під час аварій.

У стислих водах навігаційні перешкоди та інтенсивне суднопластво ускладнюють плавання морських суден, створюючи передумови для виникнення аварійних навігаційних ситуацій, що знижують надійність судноводіння. Для забезпечення належного рівня надійності судноводіння слід виявити суттєві чинники її залежності та розробити засоби зниження їх негативного впливу, що потребує розробки методів кількісної оцінки надійності судноводіння та способів забезпечення її належного рівня.

Вказані обставини обумовлюють актуальність і перспективність розробки способів оцінки надійності судноводіння та їхнього покращення.

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

При виконанні дисертаційної роботи урахувались 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), положення Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), а також плани наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» в рамках держбюджетної теми «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувач виконав окремий підрозділ та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), в якій здобувачу належить окремий розділ.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження являється забезпечення належного рівня безпеки судноводіння шляхом розробки методів підвищення надійності процесу судноводіння в стислих районах плавання.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про можливість підвищення надійності судноводіння розробкою та застосуванням методів кількісної оцінки безпеки судноводіння в стислих водах з використанням сучасних математичних моделей та комп'ютерних інформаційних технологій.

Головною задачею дослідження є розробка методів визначення кількісної оцінки характеристик надійності судноводіння в стислих умовах плавання та шляхи її можливого підвищення.

За допомогою методів теорії дослідження операцій для вирішення головної задачі дисертації було проведено її декомпозицію на складові задачі, які є незалежними. Головну задачу дисертації було розділено на наступні складові задачі:

1. Синтез методу апріорної оцінки вірогідності безпечної проводки судна стислим маршрутом з урахуванням векторіальних позиційних похибок і траєкторних похибок управління.

2. Розробка методу кількісної оцінки надійності судноводіння із використанням інтенсивностей випадкових потоків аварійних подій, що базуються на математичних моделях оцінки апріорної вірогідності проводки судна стислим маршрутом.

3. Методом максимальної правдоподібності розробити алгоритм оцінки ефективних обсервованих координат судна в разі наявності надмірних вимірювань, похибки яких не підкоряються нормальному закону розподілу.

4. Дослідити вплив типу динамічної моделі обертального руху судна на величину векторіальної траєкторної похибки управління.

5. Для розрахунку обсервованих координат судна по загальному алгоритму, який не залежить від закону розподілу похибок вимірювань, розробити універсальний метод стохастичного опису випадкових похибок вимірювань з використанням ортогонального розкладання їх щільності розподілу.

6. Провести комп'ютерне імітаційне моделювання для перевірки коректності методів оцінки ефективності обсервованих координат судна за наявності надмірних вимірювань, що розраховані методом найменших квадратів, похибки яких розподілені за змішаними законами першого і другого типу.

7. Сформуванати процедуру застосування електронних карт для оцінки апріорної вірогідності безпечного плавання судна стислим маршрутом і вибору безпечної траєкторії руху з урахуванням траєкторної похибки управління.

**Об'єктом дослідження** дисертації є процес судноводіння.

**Предметом дослідження** є методи підвищення надійності судноводіння.

**Методи дослідження.** Для рішення проблеми дисертаційного дослідження було застосовано наступні методи:

- системного підходу для визначення методологічного типу проблеми дисертаційного дослідження, як проблеми із з'ясованими істотними залежностями;
- дослідження операцій, методи яких визначають методологію дослідження сформульованих в дисертації проблем, і забезпечують коректне розділення головної задачі на складові незалежні задачі і формування головної математичної моделі та допоміжних моделей дослідження;
- математичного програмування для вирішення задачі оптимізації задачі безпечної проводки судна стислим маршрутом по критерію вірогідності;
- теорії вірогідності, за допомогою яких проводиться розробка математичних моделей оцінки апріорної вірогідності безпечного плавання судна стислим маршрутом;
- теорії похибок для розробки методу максимальної правдоподібності визначення координат судна при наявності надмірних вимірювань;
- математичної статистики для використання ортогонального розкладу густини розподілу похибок вимірювання з цілю визначення обсервованих координат судна при надмірних вимірюваннях;
- теорії управління, які забезпечують формалізацію залежності траєкторних похибок управління судном від типу динамічної моделі його повороту;
- імітаційного моделювання для перевірки коректності методу визначення ефективності обсервованих координат судна.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в розробці теоретичних засад та методологічного забезпечення оцінки надійності судноводіння та її підвищення способами мінімізації векторіальних позиційних

похибок та траєкторних похибок управління, які відрізняються використанням розроблених алгоритмів визначення ефективних координат судна за наявності надмірних вимірювань, що базуються на ортогональному розкладанні щільності розподілу їх похибок, та адекватних прогностичних моделях повороту судна.

Наукові положення, які обґрунтовані науковими результатами.

***Вперше:***

- розроблено спосіб оцінки ефективних обсервованих координат судна за допомогою методу максимальної правдоподібності за наявності надмірних вимірювань, похибки яких не підкоряються нормальному закону розподілу, для забезпечення максимальної точності визначення місця судна;

- синтезовано процедуру комп'ютерного імітаційного моделювання оцінки ефективності обсервованих координат судна, розрахованих методом найменших квадратів за допомогою генерування надмірних вимірювань, похибки яких розподілені за змішаними законом першого та другого типу, для підтвердження коректності запропонованих теоретичних методів оцінки ефективності обсервованих координат;

- запропоновано й розроблено універсальний метод стохастичного опису випадкових похибок навігаційних вимірювань із використанням ортогонального розкладання їхньої щільності розподілу для розрахунку обсервованих координат судна за загальним алгоритмом незалежно від закону розподілу похибок вимірювань;

- розроблено метод кількісної оцінки надійності судноводіння шляхом використання інтенсивностей випадкових потоків аварійних подій і розроблених математичних моделей для визначення апріорної вірогідності проведення судна стислим маршрутом;

- запропоновано методи апріорної оцінки вірогідності безпечного плавання судна стислим районом застосуванням векторіальних позиційних похибок і траєкторних похибок управління для мінімізації ризику виникнення навігаційної аварії;

- досліджено вплив динамічної моделі обертального руху судна, що використана для прогнозу його повороту, на величину векторіальної траєкторної похибки управління шляхом аналізу запропонованих моделей для мінімізації траєкторної похибки;

***Одержали подальший розвиток*** методи застосування електронних карт шляхом використання розробленого методу оцінки апріорної вірогідності безпечного плавання судна стислим маршрутом для вибору безпечної траєкторії руху судна.

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведеному дисертаційному дослідженню властиве практичне значення, яке полягає у тому, що його результати можуть бути упроваджені на судна в процесі експлуатації, а також використані розробниками судових навігаційних інформаційних систем.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що теоретичні результати і програми, які одержані в роботі, можуть бути застосовані при навчанні і для підвищення кваліфікації судноводіїв.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 12.12.2018 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 14.02.2019 р.) та Херсонською державною морською академією (акт про впровадження від 22.02.2019 р.) для підготовки курсантів та студентів, компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 04.03.2019 р.), Філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 06.09.2019 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт про впровадження від 18.06.2019 р.), в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувач виконав окремий підрозділ та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), в якій здобувачу належить окремий розділ.

Під час виконання дисертаційної роботи були отримані патенти на корисну модель:

- «Пристрій для інформаційного забезпечення лоцманської проводки морського судна» №78679. Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 25.03.2013, Бюл. №6;

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

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

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота виконана здобувачем самостійно: здійснено інформаційний пошук по темі дисертації та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки судноводіння, проведено розробку методологічного забезпечення по темі дисертаційної роботи, здобувач отримав рішення складових задач дослідження і ним було досягнуто рішення головної задачі дисертації, він також формалізував алгоритми, які необхідні для розробки комп'ютерної імітаційної програми, та впроваджені результати роботи в виробничий процес.

Особистий внесок автора у колективних наукових працях конкретизовано у переліку опублікованих праць.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на Всеукраїнських та Міжнародних науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях: «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 21-23 травня 2014 р.), «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 18-19 листопада 2014 р.), «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одеса, 19-20 листопада 2015 р.), «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.), «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)» (Херсон, 24-26 травня 2016 р.), «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.), «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 вересня 2017 р.), «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р.), «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)» (Херсон, 29-31 травня 2018 р.), «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 15-16 листопада 2018 р.), 24<sup>th</sup> International Scientific Conference «Transport Means 2020» (Kaunas, Lithuania, September 30 – October 02, 2020).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 49 наукових праць (з них 18 одноосібно) та 3 патенти на корисну модель, в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 19 наукових статей [3-10, 12-18, 20, 24, 26, 35] та в монографії [1]; в зарубіжних наукових профільних виданнях - 12 наукових статей [2, 19, 21, 22, 25, 28-34] та 2 монографії [23, 27]; 1 навчальний посібник [11]; у збірниках матеріалів наукових конференцій - 14 доповідей [39-52].

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (227 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 448 сторінок та містить 128 рисунків, зокрема: 256 сторінок основного тексту, 26 сторінок списку використаних джерел, 166 сторінок додатків.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**Вступ** роботи визначає актуальність теми дисертації, її зв'язок з програмами наукових досліджень. У вступі зазначено мету, викладено головну задачу дисертаційного дослідження та її складові незалежні задачі, сформульована його наукова новизна і основне положення та вказано на практичне значення дисертаційної роботи.

У **першому розділі** в результаті огляду літературних джерел проведено аналіз основних аспектів вирішення проблеми забезпечення безаварійного плавання суден.

Встановлено, що основними напрямками рішення проблеми забезпечення безаварійного судноводіння являються розробка методів попередження зіткнення суден у стислих районах інтенсивного судноплавства, застосування сучасних інформаційних технологій для підвищення безпеки судноводіння та забезпечення оцінки безпеки судноводіння в стислих умовах плавання та підвищення точності визначення місця судна.

Вітчизняні вчені Вагущенко Л.Л., Цимбал М.М., Мальцев А.С., Аксютін Л.Р., Кондрашихін В.Т., Воробйов Ю.Л., та іноземні вчені Фрейдзон І.Р., Statheros T., Hornauer S., Lisowski J. зробили значний внесок в рішення зазначених проблем.

В розділі обґрунтовано основний напрям дисертаційного дослідження, що присвячене подальшому вдосконаленню методів забезпечення оцінки безпеки судноводіння в стислих умовах плавання та підвищення точності визначення місця судна.

**Другий розділ** дисертаційної роботи містить відомості стосовно вибору теми дослідження. Приведена методологічна структура дисертаційного дослідження та її методологічне забезпечення.

У методологічному обґрунтуванні дослідження сформульована його мета та головна задача, яка за допомогою методів дослідження операцій розділена на незалежні складові задачі. Запропонована робоча гіпотеза дослідження, а при рішенні незалежних складових задач було одержано нові наукові результати дисертаційної роботи.

У другому розділі зазначено практичну цінність дисертаційного дослідження, а також сформульовано його основне наукове положення. Запропоновано методика вирішення складових задач, що поставлені в роботі, яка визначає логіку і основні етапи проведення наукового дослідження по дисертаційній темі.

У **третьому розділі** досліджено вплив точності проводки судна стислим маршрутом на надійність судноводіння, що являється першою та другою складовими задачами дисертаційного дослідження.

Кількісна оцінка досягнутого рівня навігаційної безпеки й вплив на нього проведених заходів викликає серйозні труднощі. Статистика аварій відображає лише довгострокові тенденції минулого, що знижує її значення

для прийняття оперативних заходів. Тому необхідно розробляти методи кількісної оцінки впливу окремих чинників на безпеку судноводіння. Основною таких методів може слугувати загальна теорія надійності функціонування складних систем, а основним показником надійності судноводіння запропонована ймовірність відсутності навігаційної аварії протягом певного інтервалу часу.

Аварії суден виникають внаслідок посадок на міліну й навалів через позиційні похибки, зіткнення суден, а також посадки на міліну та навали через похибки керування.

Таким чином, аварійність суден доцільно характеризувати потоком аварійних подій за кожною із зазначених причин. Згадані три потоки аварійних подій є незалежними й в першому наближенні їх можна розглядати, як найпростіші (стаціонарні пуасонівські) потоки. Тому їх сумарний потік також можна вважати найпростішим. Інтенсивність сумарного потоку  $\lambda_{\Sigma}$  виражається формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3,$$

де  $\lambda_1$  – інтенсивність аварійних подій з причини посадок на міліну й навали через позиційні помилки;

$\lambda_2$  – інтенсивність аварійних подій з причини зіткнень суден;

$\lambda_3$  – інтенсивність аварійних подій з причини посадок на міліну й навали через похибки керування.

Для виявлення чинників, що впливають на ймовірність безаварійного плавання, і розробки заходів щодо забезпечення необхідного рівня безпеки судноводіння слід розробити математичні моделі для оцінки інтенсивностей  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  і  $\lambda_3$ . В даному розділі розглянуто математичну модель для оцінювання інтенсивності  $\lambda_1$ , основною причиною якої є векторіальні позиційні похибки. У дисертаційній роботі розглянуто процедуру оцінки ймовірності безаварійного плавання судна  $P_b$  в стислих умовах за обраним маршрутом, який залежить від основних істотних чинників: характеристики обмеженості допустимої зони плавання; характеристик точності, що забезпечується системою навігаційного обладнання, що виражаються в параметрах функції двовимірного розподілу векторіальної позиційної похибки; вибору програмної траєкторії в допустимій зоні плавання, що впливає на співвідношення нормальних відстаней до межі безпечної зони, і довжини програмної траєкторії.

Розглянуто математичну модель визначення ймовірності безаварійного плавання судна  $P_b$  за обраним маршрутом з відомими характеристиками та заданою двовимірною щільністю розподілу позиційної похибки  $f_t(\Delta\varphi, \Delta w)$ . Як ймовірність  $P_b$  доцільно використовувати апріорну ймовірність безпечного проведення судна за обраним маршрутом.

В роботі показано, що вся область безпечного плавання судна по маршруту  $D$  розбивається на підобласті  $D_j$ , тобто  $D = \bigcup D_j$ , а векторіальну позиційну похибку  $\bar{r}$  в процесі проводки судна можливо описати в вигляді виродженого стохастичного процесу, загальна щільність якого

$$f(\bar{r}) = \prod_{j=1}^n f(\bar{r}_j(t), \bar{m}_j, K_j),$$

де  $\bar{m}_j$  і  $K_j$  - відповідно математичне очікування і коваріаційна матриця похибки  $\bar{r}$ .

Ймовірність безпечного плавання є ймовірністю того, що дійсна траєкторія руху судна належить ділянці  $D$ , тобто ймовірність того, що кожна точка траєкторії руху судна належить безпечній області  $D$ . Оскільки рух судна в першому наближенні можна описувати лінійною моделлю, то траєкторія його руху є сукупністю  $n$  послідовних лінійних ділянок, кожна з яких – переміщення судна за інтервал часу  $\Delta t$  між послідовними моментами корекції параметрів його руху.

Тому ймовірність того, що вся траєкторія руху судна належить області  $D$ , є ймовірністю того, що всі ділянки траєкторії руху судна одночасно належать області  $D$ :

$$P_{bn} = P(\bar{r} \in D) = \prod_{j=0}^n \iint_{D_{t+j\Delta t}} f(\bar{r}_j(t), \bar{m}_j, K_j) dS_j. \quad (1)$$

За допомогою розробленої комп'ютерної програми для оцінки ймовірності безаварійного плавання судна  $P_{bn}$  розглянутим способом виконувалося імітаційне моделювання, у результаті якого генерувалися випадкові траєкторії руху судна відносно програмної. Для цього відносно кожної обсервованої точки випадковим чином формується векторіальна похибка, яка підкоряється закону розподілення Гаусу із заданим с. к. в. і нульовим математичним сподіванням. Вона визначає справжнє місце судна, а з'єднання всіх таких точок дає реалізацію випадкової траєкторії. Програмою генерується 1000 таких траєкторій і перевіряється належність кожної з них до припустимої області безпечного плавання  $D$ , як показано на рис. 1. Частина траєкторій, що належать області  $D$ , саме й визначає ймовірність  $P_{bn}$ , яка відображається на інформаційному табло і співпадає із значенням, яке розраховано за допомогою виразу (1).

На рис. 1 наведена ситуація з неприпустимо низькою ймовірністю  $P_{bn} = 0,490$ , що загрожує посадкою судна на мілину. Причиною такої низької ймовірності є несиметричне розташування програмної траєкторії руху відносно меж безпечної області плавання та велика стислість ділянки відносно с. к. в. позиційної векторіальної похибки.

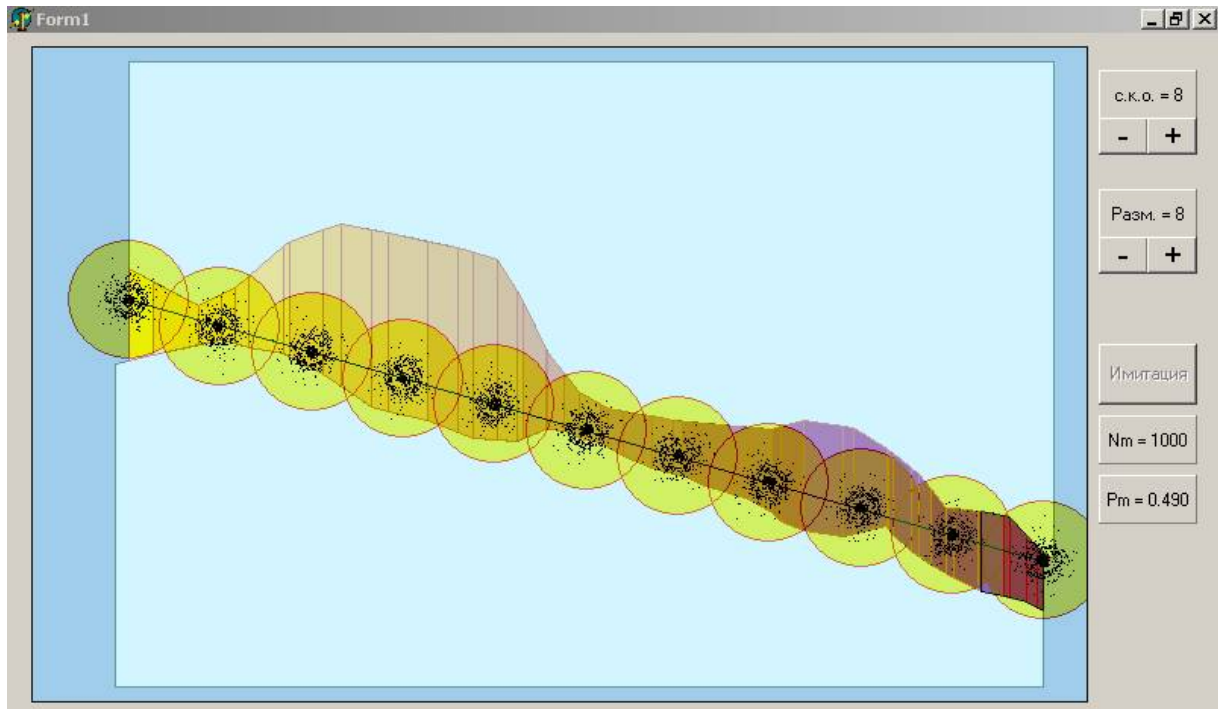


Рисунок 1 – Плавання судна з неприпустимою ймовірністю  $P_{bn}$

Пропонований спосіб оцінки ймовірності безаварійного плавання судна вимагає розв'язання задачі з використанням двовимірної щільності розподілу ймовірностей векторіальної похибки й багаторазовим її інтегруванням в межах безпечної області  $D$ , які мають складну форму. Тому практична реалізація даного аналітичного способу оцінки ймовірності  $P_b$  є досить складною й трудомісткою.

Тому в дисертації розглянуто альтернативний спосіб визначення апріорної ймовірності  $P_b$ , розглядаючи задачу в рамках одновимірного простору з використанням одновимірної щільності похибки бічного відхилення судна відносно програмної траєкторії руху. У запропонованій моделі вважаємо, що допустима область безпечного плавання  $D$  задана аналітичним описом її правої  $G_{st}(X, Y)$  і лівої  $G_{pt}(X, Y)$  меж у вигляді двовимірних масивів. Також задана програмна траєкторія руху судна  $Tr_{pr}(X, Y)$ , кожна точка якої характеризується парою нормальних відстаней до правої і лівої меж безпечної області  $D$ . Ці відстані позначені відповідно  $L_{st}(X, Y)$  і  $L_{pt}(X, Y)$ , враховуючи, що  $(X, Y) \in Tr_{pr}(X, Y)$ .

В дисертаційному дослідженні отримано аналітичний вираз для оцінювання ймовірності  $P$  безпечного плавання стисненим маршрутом в разі альтернативної одновимірної моделі, який має наступний вигляд:

$$P = \exp \left\{ s \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \varphi(b) \ln \left\{ \int_{\delta_{b\min}}^{\delta_{b\max}} \gamma(\delta_b, b) \left[ F\left(\frac{b}{2} - \delta_b\right) + F\left(\frac{b}{2} + \delta_b\right) \right] d\delta_b \right\} db \right\}, \quad (2)$$

у якому прийняті наступні позначення:

$s$  – довжина програмної траєкторії;

$b_{\min}$  і  $b_{\max}$  – відповідно мінімальне й максимальне значення ширини  $b$  допустимої ділянки;

$\varphi(b)$  – розподілом частот за значеннями ширини  $b$  допустимої ділянки;

$\delta_{b\max}$  і  $\delta_{b\min}$  – відповідно максимальне й мінімальне значення зміщення  $\delta_b$  програмної траєкторії руху судна;

$\gamma(\delta_b, b)$  – безумовний розподіл частот виникнення зміщення  $\delta_b$  в залежності від значення ширини  $b$  допустимої ділянки;

$F$  – функція розподілу ймовірностей похибки бічного відхилення.

Для спрощення розрахунків вираз (2) перетворено до дискретного вигляду:

$$P = \exp \left\{ \sum_{i=0}^{\Delta b} \left\{ \sum_{j=1}^{m_i} \ln \left[ F\left(\frac{b_{\min} + i}{2} - \delta_{bij}\right) + F\left(\frac{b_{\min} + i}{2} + \delta_{bij}\right) \right] \right\} \right\},$$

де  $\Delta b = b_{\max} - b_{\min}$ ;  $m_i$  – число значень ширини  $b_i$ .

В роботі проведено порівняльну характеристику двовимірної й одновимірної моделей оцінки ймовірності безпечного проведення судна заданим маршрутом за допомогою імітаційного моделювання. Для одного й того ж маршруту плавання, що містить межі безпечної ділянки плавання та програмну траєкторію руху судна, проводився розрахунок ймовірності безпечного проведення судна заданим маршрутом за обома моделями і отримані результати порівнювалися. Ймовірність, отриману за моделлю одновимірної щільності, позначено через  $P_1$ , а за моделлю двовимірної щільності – через  $P_2$ .

За допомогою комп'ютерної програми формувалися п'ять варіантів стисненого маршруту плавання судна, для чого вводилися масиви меж ділянки безпечного плавання й програмна траєкторія плавання судна, вибиралося значення  $s$ ,  $k$ ,  $v$  та приймалося, що похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу. Потім проводився розрахунок оцінки ймовірності  $P_2$  безпечного проведення судна стислим маршрутом. Далі за допомогою комп'ютерної програми були визначені одномірні характеристики кожного з маршрутів, до яких належать його стислість і зміщеність програмної траєкторії, які дозволили зробити точну оцінку ймовірності безпечного плавання  $P_1$  за одновимірною моделлю.

Отримані результати представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оцінки ймовірності безпечного проведення судна

| Маршрут        | 1     | 2     | 3      | 4      | 5      |
|----------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| $P_1$          | 0,487 | 0,543 | 0,9818 | 0,9179 | 0,8149 |
| $P_2$          | 0,484 | 0,546 | 0,982  | 0,916  | 0,817  |
| $\delta P$ (%) | 0,6   | 0,5   | 0,02   | 0,2    | 0,3    |

Середня відносна різниця між оцінками ймовірності проведення судна за обома моделями, як впливає з табл. 1, становить 0,3%, що підтверджує правомірність оцінки ймовірності проведення судна за стисненим маршрутом моделлю із застосуванням одновимірної щільності розподілу похибки бічного відхилення. З урахуванням отриманого результату для оцінки ймовірності безпечного проведення судна стисненим маршрутом при попередньому опрацюванні рейсу доцільно скористатися одновимірною моделлю.

Для практичного застосування запропонованого способу оцінки ймовірності безпечного проведення судна необхідно формувати реальний маршрут проведення судна в стислом районі плавання, для чого потрібне застосування електронних карт. Тому в імітаційній комп'ютерній програмі передбачений вибір і виведення електронних карт.

Таким чином, у розділі проведено розробку методу кількісної оцінки надійності судноводіння із використанням інтенсивностей випадкових потоків аварійних подій та синтез методу апріорної оцінки вірогідності безпечної проводки судна стислим маршрутом з урахуванням векторіальних позиційних похибок.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1-9, 11-13, 16, 18, 27-29, 35, 40, 42-46].

У **четвертому розділі** розглянуто залежність безпеки судноводіння від векторіальної похибки керування судном, що передбачається першою та четвертою складовими задачами дисертаційного дослідження.

Розділ присвячений залежності безпеки судноводіння від векторіальної похибки керування судном. Представлено модель формування векторіальної похибки керування, яка є сумою систематичної і випадкової складових. Отримано залежність величини систематичної похибки керування від вибору динамічної моделі поворотності судна.

Поява векторіальної похибки відносно прогнозованої точки виходу судна на новий курс після завершення повороту судном може бути обумовлено наступними обставинами.

Розрахунок моментів часу початку повороту  $t_n$  проводиться з урахуванням динамічної моделі обертального руху судна, що визначає прогно-

зовану траєкторію, яка відрізняється від його реальної криволінійної траєкторії, чим викликане виникнення систематичної похибки  $\Delta t_n$  у визначенні моменту часу початку повороту судна  $t_n$ . Ця похибка є систематичною складовою  $S^{(d)}$  векторіальної похибки керування.

Крім систематичної похибки можлива поява випадкових векторіальних похибок через перекладання пера керма  $\Delta\beta_k$  і похибки моменту часу початку повороту  $\Delta t$  відносно розрахованого моменту часу  $t_n$ .

Момент часу початку повороту  $t_n$  розраховується з огляду на обрану динамічну модель обертального руху судна, яке має швидкість  $V_o$ . З урахуванням реальної траєкторії руху поворот слід починати в момент часу  $\tilde{t}_n$ , тому систематична векторіальна похибка  $S^{(d)}$  визначається виразом:

$$S^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n).$$

Векторіальна похибка керування судном складається як із систематичної  $S^{(d)}$ , так і випадкової  $S^{(c)}$  похибок, причому випадкова складова є сумою векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$  і векторіальної похибки  $S^{(t)}$ .

У роботі представлені динамічні моделі обертального руху судна різного ступеня адекватності його реальному повороту, за допомогою яких можливий розрахунок тривалості повороту судна і збільшення координат судна за цей час. Причому розглянуті три типи динамічних моделей обертального руху припускають миттєву перекладку пера керма.

Імітаційне моделювання траєкторій повороту судна за допомогою експериментального матеріалу дозволило зробити вибір найбільш адекватної моделі його обертального руху. Експериментальний матеріал був отриманий в реальних умовах експлуатації й послужив для розрахунку чисельних значень інерційних характеристик суден.

Найбільш прийнятною для прогнозування повороту виявилась математична модель поворотності судна третього типу, оскільки при достатній простоті вона має необхідну точність (максимальна розбіжність експериментальної і модельної траєкторій  $25 \div 30$  м) і за допомогою цієї моделі розраховується момент часу  $\tilde{t}_n$  дійсного початку повороту судна.

У роботі показано, що інтенсивність  $\lambda_3$  аварійних подій з причини посадок судна на мілину через векторіальну похибку керування оцінюється виразом:

$$\lambda_3 = 0,2(1 - P_{bc}),$$

причому

$$P_{bc} = \prod_{j=1}^n \left\{ \left[ \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_{pzn}(x, y) dy dx \right] \left[ \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{f_{si}(x)}^{f_{pi}(x)} f_c^S(x, y) dy dx \right] \right\}_j,$$

де  $n$  – кількість поворотів на маршруті проводки;

$a_i, f_{si}(x), f_{pi}(x)$  - параметри розбиття безпечної області повороту судна на ділянки;

$f_{pzn}(x, y)$  - двовимірна щільність розподілу позиційної векторіальної похибки;

$f_c^S(x, y)$  - щільність векторіальної похибки керування.

Для зниження впливу траєкторної похибки повороту судна на безпеку судноводіння її врахування слід проводити оперативно в процесі керування судном спільно з іншими джерелами можливої аварійності судна. З цією метою в розділі розглянуто спосіб оперативної оцінки безпеки плавання в стислому районі, який відображений електронною картою з нанесеними характеристиками основних факторів, що впливають на безпеку. До них відносяться характеристики позиційної векторної похибки, яка характеризується показником точності  $D_{md}$ , що є дисперсією модуля траєкторної похибки в заданій точці. На електронній карті можна відобразити поле точностей, кожна точка якого характеризується значенням показника  $D_{md}$ , в залежності від кількості орієнтирів, що використовуються для обсервації.

Відображення поля точностей на електронній карті в районі плавання судна вимагає вибору орієнтирів, за якими здійснюється контроль місця судна. Залежно від числа і геометрії розташування орієнтирів для кожної точки району проходження судна розраховується значення показника точності  $D_{md}$ .

Вся інформація, яка характеризує поточну навігаційну ситуацію, пов'язана з графічним представленням, тому основою комплексного відображення навігаційної ситуації є електронна карта району плавання судна. На ній можна побачити поточні позиції судна і найближчих цілей.

В роботі в якості одного із прикладів імітаційного моделювання використана електронна карта підходів до порту Чорноморськ. Після попереднього аналізу навігаційної обстановки було прийнято рішення в якості трьох орієнтирів для визначення місця судна вибрати орієнтири, які показані на рис. 2 і відзначені колами зеленого кольору.



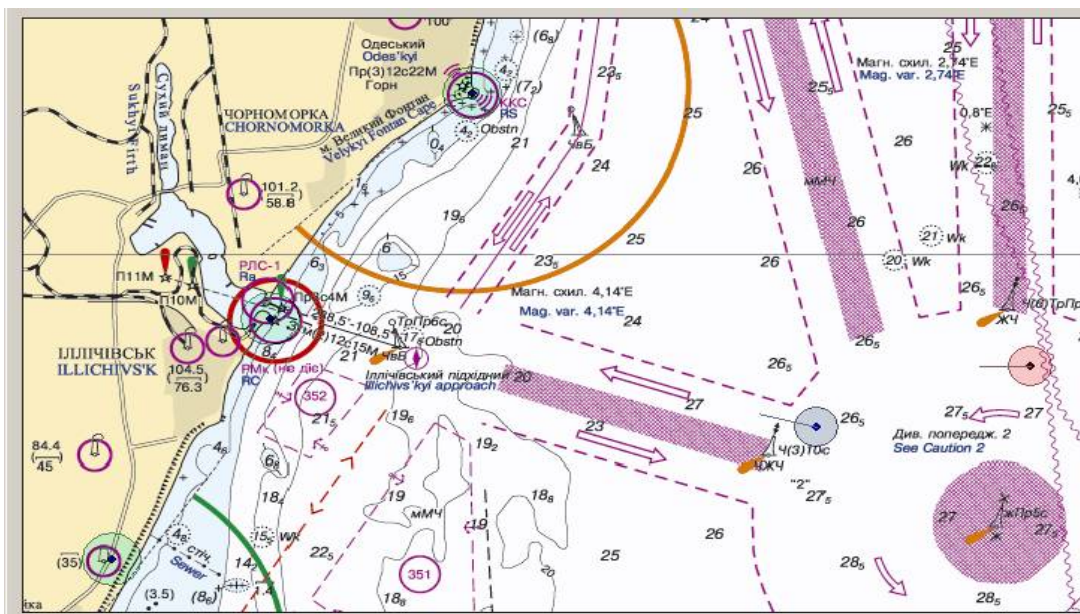


Рисунок 2 – Вибір трьох орієнтирів для визначення місця

Поле точностей обраних орієнтирів з оцифруванням представлено на рис. 3, аналіз якого показав, що точність проходження судна програмним маршрутом становить близько 60 метрів.



Рисунок 3 – Відображення поля точностей з оцифруванням

В завершення розділу приведено оцінку величини траєкторної похибки повороту судна за результатами натурних спостережень. Величину траєкторної похибки повороту судна визначали шляхом зіставлення при-

рошення координат судна за час повороту, розрахованих за динамічною моделлю обертального руху судна  $\Delta X_{md}$  і  $\Delta Y_{md}$  з припущеннями координат  $\Delta X_{GPS}$  і  $\Delta Y_{GPS}$ , отриманих за допомогою DGPS, для обраного маневру зміни курсу.

В якості динамічної моделі обертального руху судна обрана найбільш точна третя динамічна модель зміни курсу судна при повороті. Для теплоходу "Celandine" типу Ro-Ro було проведено верифікацію моделі обертального руху. Параметри моделі (постійні часу  $T_1$ ,  $T_2$ , а також сталі значення кутової швидкості повороту судна  $a_\omega$ ) визначені для повороту судна з кутами кладки пера керма від 5 до 30 градусів включно.

Після цього виконується реальний поворот судна з тим же припущенням курсу  $\Delta K$  і кладкою пера керма, а навігаційною системою DGPS проводиться високоточне вимірювання припущення координат судна  $\Delta X_{GPS}$  і  $\Delta Y_{GPS}$  за час його маневру. Величина модуля траєкторної похибки  $R_t$  визначається відстанню між прогнозованою і обсервованою точками траєкторії після завершення маневру, тобто за допомогою виразу:

$$R_t = \sqrt{(\Delta X_{GPS} - \Delta X_{md})^2 + (\Delta Y_{GPS} - \Delta Y_{md})^2}.$$

По результатам натурних спостережень і розрахунків величини модуля траєкторної похибки  $R_t$  в роботі побудовано номограму.

Таким чином, у розділі досліджено вплив типу динамічної моделі обертального руху судна на величину векторіальної траєкторної похибки управління та на оцінку апріорної оцінки вірогідності безпечної проводки судна стислим маршрутом.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1,14,15,19,21,27,43,45,46].

**У п'ятому розділі** методом максимальної правдоподібності розроблено алгоритм оцінки ефективних обсервованих координат судна в разі наявності надмірних вимірювань, похибки яких не підкоряються нормальному закону розподілу, що являється третьою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі розглянуто оцінку ефективності обсервованих координат судна, розрахованих способом найменших квадратів, коли передбачуваним є нормальний закону розподілу з щільністю розподілу  $\phi(\xi)$ , а дійсний закон розподілу з щільністю  $f(\xi)$  може відрізнятись від передбачуваного. В цьому разі, як показано в дисертації, ефективність обсервованих координат визначається виразом:

$$e = \frac{q^2}{ps},$$

де

$$p = \int_{R1} f(\xi) \left\{ \left[ \frac{\partial \phi(\xi)}{\partial \xi} \right]^2 \right\} d\xi, \quad s = \int_{R1} \frac{\left[ \frac{\partial f(\xi)}{\partial \xi} \right]^2}{f(\xi)} d\xi,$$

$$q = \int_{R1} f(\xi) \left\{ \frac{\left[ \frac{\partial^2 \phi(\xi)}{\partial \xi^2} \right] \phi(\xi) - \left[ \frac{\partial \phi(\xi)}{\partial \xi} \right]^2}{\phi^2(\xi)} \right\} d\xi,$$

В розділі розглянуто ефективність обсервованих координат судна, якщо дійсна щільність розподілу ймовірностей похибок ліній положення є щільністю змішаного розподілу першого типу, а передбачувана щільність розподілу похибок  $\phi(\xi)$  є нормальною.

Дійсна щільність має наступний аналітичний вигляд:

$$f(\xi) = \frac{A_m}{(\xi^2/2 + \lambda)^{m+1}}, \quad (m \leq 6)$$

де  $A_m = \frac{2^{2m} (m!)^2}{\sqrt{2\pi} (2m)!} \lambda^{m+1/2}$  – нормуючий множник;  $\lambda$  – масштабний пара-

метр;  $m$  – істотний параметр, який приймає цілочисельні значення.

Передбачувана щільність нормального розподілу:

$$\phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

У розділі отримано вирази для невласних інтегралів  $q$ ,  $p$ , і  $s$ , які мають такий вигляд:

$$q = -\frac{1}{\sigma^2}, \quad p = \frac{1}{\sigma^4} \frac{2\lambda}{2m-1}, \quad s = \frac{(m+1)(2m+1)}{2\lambda(m+2)}.$$

В цьому випадку ефективність:

$$e = 1 - \frac{3}{2m^2 + 3m + 1}.$$

Ефективність оцінки обсервованих координат, розрахованих методом найменших квадратів в разі, коли випадкові похибки навігаційних вимірювань розподілені за першим змішаним законом менше одиниці, а її значення в залежності від істотного параметра наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Ефективність змішаного розподілу першого типу

|   |     |     |       |       |       |       |
|---|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| m | 1   | 2   | 3     | 4     | 5     | 6     |
| e | 0,5 | 0,8 | 0,893 | 0,934 | 0,955 | 0,968 |

В розділі також розглянуто випадок, коли похибки ліній положення розподілені за змішаним законом другого типу, а вираз для ефективності має наступний вигляд:

$$e = 1 - \frac{3}{2m^2 + 5m + 3}.$$

У табл. 3 наведені значення ефективності для різних значень  $m$  змішаного закону розподілу другого типу.

Таблиця 3 – Значення ефективності  $e$  змішаного закону розподілу другого типу

|   |     |       |       |       |       |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|
| m | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     |
| e | 0,7 | 0,857 | 0,917 | 0,945 | 0,962 |

Розглянуті випадки показують, що застосування методу найменших квадратів і найменшої квадратичної форми в разі, якщо дійсні розподіли не збігаються з нормальними, збільшує норму коваріаційної матриці похибок вимірювання в  $e^{-1}$  разів у порівнянні з мінімально можливою. В обох випадках ефективність зростає з ростом  $m$ , наближаючись до 1, оскільки зі зростанням  $m$  щільність  $f(\xi)$  асимптотично наближається до щільності  $\phi(\xi)$  нормального закону розподілу.

Також в розділі розглянуто ефективність  $e$  обсервованих координат судна при розподілі похибок ліній положення за узагальненим законом Пуассона. Оскільки узагальнений розподіл Пуассона визначається істотним параметром  $c$ , то знайдемо залежність ефективності  $e$  від його значення, скориставшись нормованими щільностями нормального  $\phi(x)$  і узагальненого пуассонівського  $f(x)$  законів розподілу:

$$f(x) = \frac{\sqrt{c} \exp(-c)}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right), \quad \phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$

У цьому випадку ефективності  $e$  визначається наступним виразом:

$$e = \frac{\sqrt{2\pi} \exp(c)}{c^{\frac{7}{2}} \mathfrak{Z}(c)}, \quad \text{де } \mathfrak{Z}(c) = \int_{\mathbb{R}^1} x^2 \frac{\left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right) \right\}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right)} dx.$$

Для значень істотного параметра  $c$  від 3 до 20 були розраховані значення ефективності  $e$ , а результати розрахунку представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Залежність ефективності  $e$  від істотного параметра  $c$

|     |     |     |     |     |       |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| $c$ | 2,3 | 3   | 5   | 10  | 15    | 20  |
| $e$ | 1,0 | 0,7 | 0,4 | 0,2 | 0,133 | 0,1 |

З табл.4 випливає, що з ростом істотного параметра  $c$  ефективність зменшується. Тому для розрахунку обсервованих координат судна при надлишкових лініях положення, похибки яких розподілені за законом відмінним від нормального, слід замість методу найменших квадратів застосовувати метод максимальної правдоподібності.

Для формування алгоритму розрахунку ефективних обсервованих координат судна методом максимальної правдоподібності в дисертації одержано систему рівнянь правдоподібності:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\partial f_i(\xi_i)}{\partial \xi_i} = 0 \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\partial f_i(\xi_i)}{\partial \xi_i} = 0 \end{cases},$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i,$$

де  $f_i(\xi_i)$  - аналітичний вид щільності розподілу.

Для змішаних законів розподілу першого і другого типу щільність в загальному вигляді можна записати в такий спосіб:

$$f_s(\xi_i) = \frac{A_s}{(\xi_i^2/2 + \lambda_i)^{n+b}}.$$

Тоді система рівнянь правдоподібності для розглянутого випадку приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i (n+b) \frac{\xi_i}{(\xi_i^2/2 + \lambda_i)} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i (n+b) \frac{\xi_i}{(\xi_i^2/2 + \lambda_i)} = 0, \end{cases}$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i.$$

Отримані рівняння складають систему нелінійних рівнянь, яка вирішується методом простих ітерацій.

В розділі розглянуто застосування методу максимальної правдоподібності для розрахунку обсервованих координат судна при розподілі похибок ліній положення за узагальненим законом Пуассона. Для реалізації методу максимальної правдоподібності необхідно скласти функцію правдоподібності, використовуючи вираз для щільності:

$$f(\xi) = \frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})],$$

$$\text{де } B = \frac{\exp(-c)}{\sqrt{2\pi}}, \quad a_k = \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}}.$$

Система рівнянь правдоподібності для розглянутого випадку приймає наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sin\alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos\alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \end{array} \right. \quad \xi_i = X \sin\alpha_i + Y \cos\alpha_i - r_i.$$

Рішення отриманої нелінійної системи рівнянь знаходиться методом простої ітерації.

Таким чином, у розділі розглянуто використання методу максимальної правдоподібності для оцінки ефективних обсервованих координат судна в разі наявності надмірних вимірювань, похибки яких не підкоряються нормальному закону розподілу.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 17, 23, 26, 32, 33, 36-38, 47, 48, 50, 52].

**У шостому розділі** представлено розробку універсального методу розрахунку ефективних координат судна при надлишкових вимірюваннях, що являється п'ятою складовою задачею дисертаційного дослідження.

В розділі проведено розробку універсального методу розрахунку ефективних координат судна при надлишкових вимірах, для чого було застосовано ортогональне розкладання щільності розподілу похибок вимірювань в ряд Грама-Шарльє типу А.

Часто статистичні матеріали похибок навігаційних вимірювань погано узгоджуються з відомими законами розподілу, однак дають можливість розрахувати центральні моменти розподілу, що дозволяє використовувати ортогональне розкладання для опису щільності розподілу випадкових величин.

В розділі показано, що ортогональне розкладання щільності  $f(x)$  в ряд Грама-Шарльє типу А має наступний вигляд:

$$f(x) = (2\pi)^{-1/2} \sigma^{-1} \exp(-x^2/2\sigma^2) \left[ 1 + \sum_{s=2} \frac{c_{2s}}{(2s)!} H_{2s}(x/\sigma^2) \right],$$

в котрому  $\sigma^2$  і  $\mu_{2s}$  обчислюються за вихідною щільністю  $f(x)$ , а вирази для парних поліномів Ерміту  $H_{2s}(y)$  наведені нижче:

$$H_4(y) = y^4 - 6y^2 + 3;$$

$$H_6(y) = y^6 - 15y^4 + 45y^2 - 15;$$

$$H_8(y) = y^8 - 28y^6 + 210y^4 - 420y^2 + 105;$$

$$H_{10}(y) = y^{10} - 45y^8 + 630y^6 - 3150y^4 + 4725y^2 - 945;$$

$$H_{12}(y) = y^{12} - 66y^{10} + 1485y^8 - 13860y^6 + 51975y^4 - 62370y^2 + 10395.$$

В даних виразах  $y = x/\sigma^2$ .

В свою чергу коефіцієнти  $c_{2s}$  виражаються в такий спосіб:

$$c_4 = \mu_4 / \sigma^4 - 3; \quad (\text{ексцес})$$

$$c_6 = \mu_6 / \sigma^6 - 15\mu_4 / \sigma^4 + 30;$$

$$c_8 = \mu_8 / \sigma^8 - 28\mu_6 / \sigma^6 + 210\mu_4 / \sigma^4 - 315;$$

$$c_{10} = \mu_{10} / \sigma^{10} - 45\mu_8 / \sigma^8 + 630\mu_6 / \sigma^6 - 3150\mu_4 / \sigma^4 + 3780;$$

$$c_{12} = \mu_{12} / \sigma^{12} - 66\mu_{10} / \sigma^{10} + 1485\mu_8 / \sigma^8 - 13860\mu_6 / \sigma^6 + 51975.$$

В роботі було проведено аналіз збіжності щільності розподілу похибок навігаційних параметрів з її ортогональним розкладанням в залежності від числа його доданків. З цією метою для кількох відомих законів розподілу, відмінних від нормального закону, було зроблено ортогональне розкладання їх щільності і проведено порівняння значення самої щільності розподілу з її ортогональним розкладанням. В якості вихідних щільностей було вибрано щільності змішаного закону розподілу першого і другого типу,

а також щільність узагальненого закону розподілу Пуассона.

В результаті порівняння виявилось, що найкраща ефективність ортогонального розкладання досягається в разі, коли воно містить тільки один доданок  $\Phi_1^{(n)}$ , тобто оптимальне ортогональне розкладання виражається у формі:

$$f_1^{(n)}(y) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-y^2/2) [1 + \Phi_1^{(n)}],$$

де  $\Phi_1^{(n)}(y) = (\mu_4^{(n)} - 3)(y^4 - 6y^2 + 3)/24$ .

Розглянуті три закони розподілів з "обтяженими хвостами" можливо вважати ортогональним розкладанням щільності в ряд Грама-Шарльє типу А, яке містить перший член розкладання, що дозволяє застосовувати ортогональне розкладання для опису щільності похибок навігаційних вимірювань. Точність відповідності самої щільності її ортогональному розкладанню для розглянутих трьох законів розподілу підвищується з ростом значення істотного параметра. Для зіставлення кривих щільності та її ортогонального розкладання були проведені розрахунки їх значень.

На рис. 4 показано криві нормованої щільності  $g_1(\eta)$  змішаного закону першого типу для значень істотного параметра  $n=4, 6$ , які мають червоний колір. Оскільки криві щільності симетричні, то показана тільки половина кривої для додатних значень похибки, які приймають значення в діапазоні шести середньоквадратичних відхилень. На цьому ж рисунку синім кольором показані відповідні криві ортогонального розкладання.

Аналіз рис. 4 показує, що нормована щільність  $g_1(\eta)$  та її ортогональне розкладання при істотному параметрі  $n \geq 4$  практично збігаються.

Криві нормованої щільності  $g_2(\eta)$  для  $n=4, 6$  показані на рис. 5, на цьому ж рисунку синім кольором надано відповідні криві ортогонального розкладання. Як і в попередньому випадку, з рис. 5 випливає, що нормована щільність  $g_2(\eta)$  та її ортогональне розкладання при істотному параметрі  $n \geq 4$  практично збігаються.

В розділі показано, що ортогональне розкладання щільності узагальненого закону Пуассону похибок навігаційних вимірювань, яке має тільки один член, має добру збіжність з самою щільністю розподілу.

В розділі розглянуто використання ортогонального розкладання щільності похибок ліній положення для визначення обсервованих координат судна, а також одержана система рівнянь правдоподібності.



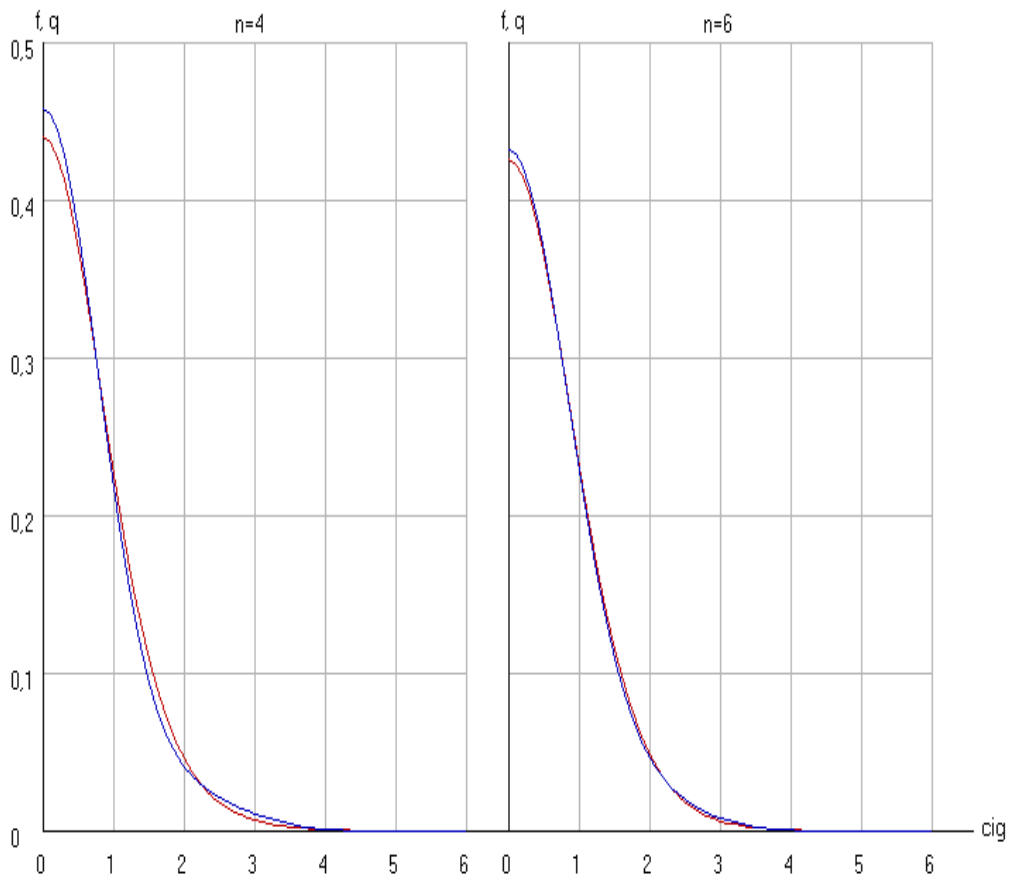


Рисунок 4 – Нормовані щільності  $g_1(\eta)$  і їх розкладання  $f(\eta)$  ( $n = 4, 6$ )

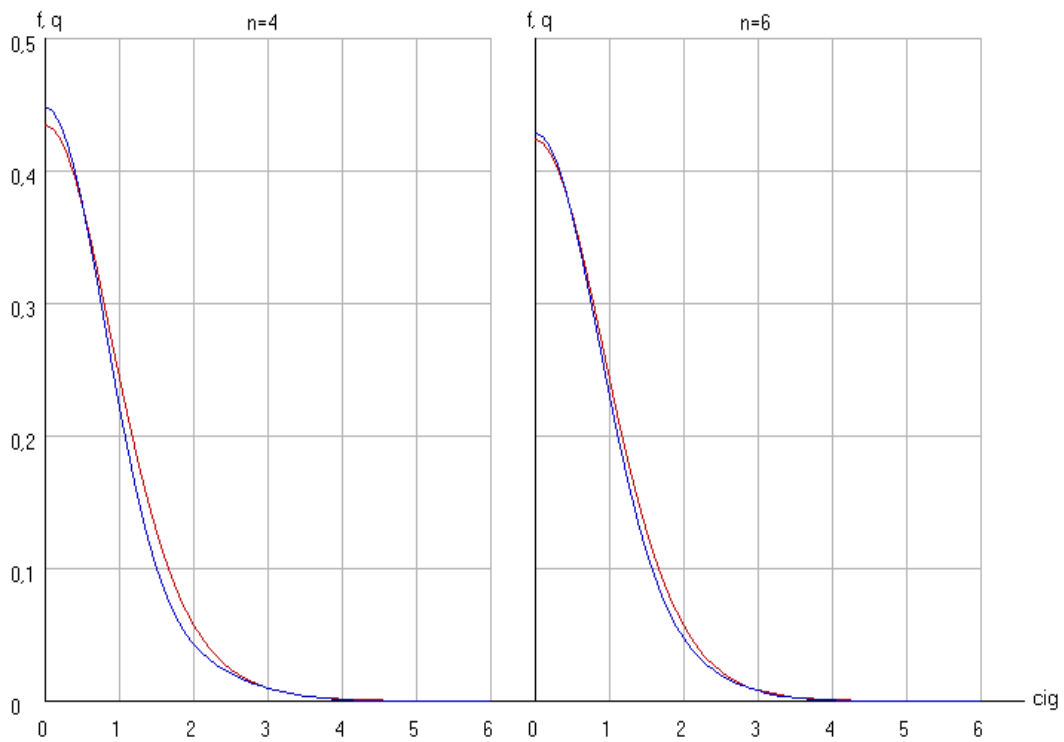


Рисунок 5 – Нормовані щільності  $g_2(\eta)$  і їх розкладання  $f(\eta)$  ( $n = 4, 6$ )

Вирішуючи цю систему рівнянь, маючи значення дисперсії  $\sigma^2$  і четвертого центрального моменту  $\mu_4$  вихідного розподілу похибок, знаходимо обсервовані координати судна, не використовуючи вираз для щільності розподілу ймовірностей похибок ліній положення.

Розглянуто випадок, коли дійсний розподіл похибок вимірювання навігаційного параметра описується щільністю  $f(x)$ , а щільністю передбачуваного закону розподілу, за яким здійснюється розрахунок обсервованих координат, є

$$\varphi(\xi_i) = (2\pi)^{-1/2} \sigma_i^{-1} \exp(-\xi_i^2 / 2\sigma_i^2) \left\{ 1 + \frac{(\mu_{4i} / \sigma_i^4 - 3)}{24!} [(\xi_i / \sigma_i^2)^4 - 6(\xi_i / \sigma_i^2)^2 + 3] \right\}$$

Для такого випадку визначено ефективність  $e_R$  обсервованих координат, якщо щільність  $f(x)$  визначається змішаним законом першого типу.

Проводився розрахунок ефективності  $e_R$ , а також ефективності  $e_G$  координат судна в разі розподілу похибок ліній положення за змішаним законом першого типу, коли розрахунок координат виконувався методом найменших квадратів. Значення ефективності  $e_R$  і  $e_G$  наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Ефективності  $e_G$  і  $e_R$  змішаного закону першого типу

| n     | 3     | 4     | 5     | 6     | 8     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $e_G$ | 0,893 | 0,934 | 0,955 | 0,968 | 0,980 | 0,987 |
| $e_R$ | 0,994 | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |

Аналогічно визначалися ефективності  $e_R$  і  $e_G$  змішаного закону другого типу, значення яких приведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Ефективності  $e_G$  і  $e_R$  змішаного закону другого типу

| n     | 3     | 4     | 5     | 6     | 8     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $e_G$ | 0,917 | 0,945 | 0,962 | 0,971 | 0,982 | 0,988 |
| $e_R$ | 0,996 | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |

Аналіз табл. 5 і табл. 6 показує високу ефективність  $e_R$  координат судна, розрахованих запропонованим методом застосування ортогонального розкладання, яка перевищує ефективність  $e_G$  координат, отриманих методом найменших квадратів.

Таким чином, у розділі розроблено універсальний метод стохастичного опису випадкових похибок вимірювань з використанням ортогонального розкладання їх густини розподілу для розрахунку обсервованих координат судна по загальному алгоритму, який не залежить від закону розподілу похибок вимірювань.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 10, 20, 22, 24, 25, 30, 31, 41, 49, 51, 52].

**Сьомий розділ** присвячений імітаційному моделюванню та результатам натурних спостережень, що являється шостою складовою задачею дисертаційного дослідження.

З метою перевірки можливості застосування змішаних законів обох типів для опису розподілу похибок вимірювання навігаційних параметрів в реальних умовах експлуатації були проведені натурні спостереження. Для формування вибірок похибок проводилися серії вимірювання навігаційних параметрів кількістю понад 100 вимірювань. Вимірювання навігаційних параметрів проводилися на стоянці судна, причому за допомогою РЛС вимірювалися дистанція і пеленг на нерухомий орієнтир, а за допомогою приймача супутникової навігаційної системи GPS фіксувалися широта і довгота судна.

Проведено перевірку статистичних гіпотез розподілу похибок вимірювання навігаційних параметрів за 12 вибірками, одержаними протягом рейсу судна.

Надалі по кожній вибірці будувалася гістограма і проводилася перевірка статистичних гіпотез, в процесі якої визначається ступінь згоди статистичного матеріалу вибірки з вибраними законами розподілу ймовірностей похибок.

В якості альтернативних гіпотез були розглянуті закон Гауса, змішані закони першого і другого типу, а також узагальнений закон Пуассона. Для кожної вибірки розраховувалися значення критерію згоди  $\chi^2$  – Пірсона з розглянутими законами розподілу ймовірностей похибок, і як закон розподілу вибирався той, критерій згоди  $\chi^2$  – Пірсона якого має мінімальне значення. Результати експериментальних натурних спостережень за визначенням законів розподілу похибок вимірювань наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Підсумкові результати натурних спостережень

| № вибірки | Навігаційний параметр | Кількість членів | Закон розподілу | $\chi^2$ | Тривалість спостереження. |
|-----------|-----------------------|------------------|-----------------|----------|---------------------------|
| 1         | пеленг                | 150              | Гаусса          | 0,0065   | 7 годин                   |
| 2         | дистанція             | 150              | Гаусса          | 0,006    | 7 годин                   |
| 3         | широта                | 150              | 1-го типу n=3   | 0,0131   | 7 годин                   |
| 4         | довгота               | 150              | 2-го типу n=1   | 0,015    | 7 годин                   |
| 5         | пеленг                | 210              | 1-го типу n=2   | 0,011    | 1 доба                    |
| 6         | дистанція             | 210              | 2-го типу n=2   | 0,010    | 1 доба                    |
| 7         | широта                | 210              | 1-го типу n=6   | 0,0094   | 1 доба                    |
| 8         | довгота               | 210              | 1-го типу n=1   | 0,013    | 1 доба                    |
| 9         | пеленг                | 250              | 2-го типу n=3   | 0,0088   | 2 доби                    |
| 10        | дистанція             | 250              | 1-го типу n=4   | 0,0088   | 2 доби                    |
| 11        | широта                | 250              | 1-го типу n=1   | 0,010    | 2 доби                    |
| 12        | довгота               | 250              | 2-го типу n=1   | 0,009    | 2 доби                    |

Аналіз підсумкової таблиці показує, що похибки вимірювання навігаційних параметрів (пеленга і дистанції), отримані на обмеженому інтервалі часу (7 годин), підкоряються нормальному закону розподілу ймовірностей.

Для оцінки ефективності обсервованих координат, отриманих при надлишкових ЛП і розрахованих методом найменших квадратів проводилося імітаційне комп'ютерне моделювання. Причому розглядалися випадки, коли похибки ліній положення підкорялись змішаним законам першого і другого типу.

Імітаційне моделювання проводилося за наступним алгоритмом. Спочатку за обраним законом розподілу генерувалася вибірка похибок ЛП, що складається з 1000 членів. Розрахунок координат кожної обсервованої точки проводився по 8 лініях положення, причому елементи ЛП (переноси  $r_i$  і напрямки градієнтів  $\alpha_i$ ) задавалися відносно істинного місця судна., в результаті чого накопичувалася вибірка  $S_{500}$  координат векторіальної похибки чисельністю 500 значень похибки. Імітаційною комп'ютерною програмою передбачено графічне відображення положень обсервованих точок відносно математичного сподівання, що дозволяє зробити візуальну оцінку їх розсіювання.

У комп'ютерній програмі імітаційного моделювання передбачено розрахунок обсервованих координат як методом найменших квадратів, так і методом максимальної правдоподібності.

Порівняльна характеристика розсіювання обсервованих точок, похибки ліній положення яких розподілені за змішаним законом другого типу з істотним параметром  $n = 2$  представлена на рис. 6.

Розрахунок координат обсервованих точок проводився методом найменших квадратів (МНК) та методом максимальної правдоподібності (ММП).

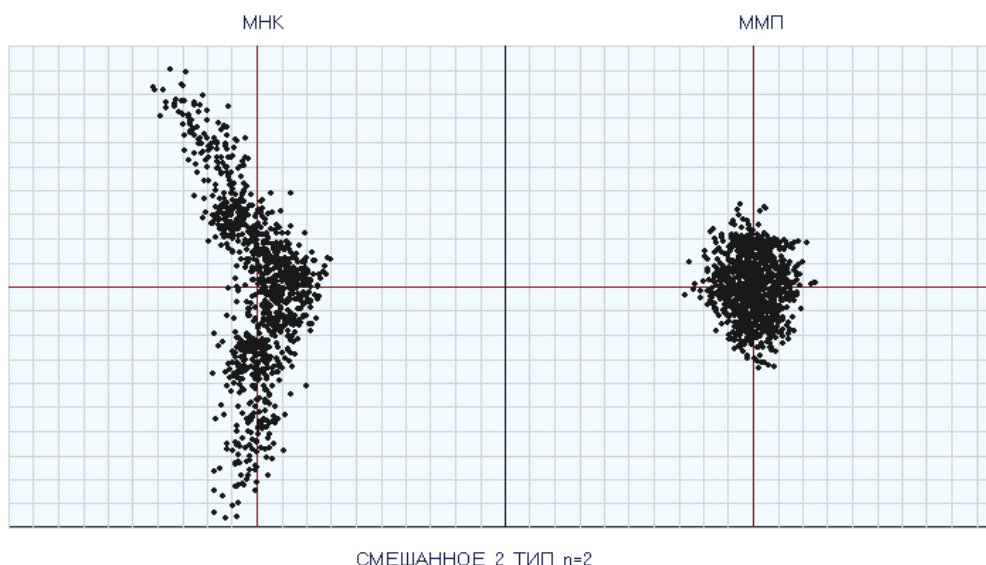


Рисунок 6 – Розсіювання обсервованих точок при  $m=2$ .

Результати імітаційного моделювання підтвердили коректність аналітичних виразів оцінки ефективності обсервованих координат, розрахованих методом найменших квадратів при розподілі похибок ліній положення за змішаними законами обох типів.

Таким чином, у розділі приведені результати комп'ютерного імітаційного моделювання для перевірки коректності методів оцінки ефективності обсервованих координат судна за наявності надмірних вимірювань, що розраховані методом найменших квадратів, похибки яких розподілені по змішаних законом першого і другого типу. Також представлені результати натурних спостережень похибок навігаційних вимірювань.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 10, 23].

## ВИСНОВКИ

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки теоретичних засад і методологічного забезпечення оцінки надійності судноводіння та її підвищення способами мінімізації векторіальних позиційних похибок та траєкторних похибок управління, які відрізняються використанням розроблених алгоритмів визначення ефективних координат судна за наявності надмірних вимірювань, що базуються на ортогональному розкладанні щільності розподілу їх похибок, та адекватних прогностичних моделях повороту судна.

У виконаному дисертаційному дослідженні одержані наступні основні наукові результати:

*Вперше:*

- розроблено спосіб оцінки ефективних обсервованих координат судна за допомоги методу максимальної правдоподібності за наявності надмірних вимірювань, похибки яких не підкоряються нормальному закону розподілу, для забезпечення максимальної точності визначення місця судна;

- синтезовано процедуру комп'ютерного імітаційного моделювання оцінки ефективності обсервованих координат судна, розрахованих методом найменших квадратів за допомоги генерування надмірних вимірювань, похибки яких розподілені за змішаними законом першого та другого типу, для підтвердження коректності запропонованих теоретичних методів оцінки ефективності обсервованих координат;

- запропоновано й розроблено універсальний метод стохастичного опису випадкових похибок навігаційних вимірювань із використанням ортогонального розкладання їхньої щільності розподілу для розрахунку обсервованих координат судна за загальним алгоритмом незалежно від закону розподілу похибок вимірювань;

- розроблено метод кількісної оцінки надійності судноводіння шляхом використання інтенсивностей випадкових потоків аварійних подій і розро-

блених математичних моделей для визначення апріорної вірогідності проведення судна стислим маршрутом;

- запропоновано методи апріорної оцінки вірогідності безпечного плавання судна стислим районом застосуванням векторіальних позиційних похибок і траєкторних похибок управління для мінімізації ризику виникнення навігаційної аварії;

- досліджено вплив динамічної моделі обертального руху судна, що використана для прогнозу його повороту, на величину векторіальної траєкторної похибки управління шляхом аналізу запропонованих моделей для мінімізації траєкторної похибки;

*Одержали подальший розвиток* методи застосування електронних карт шляхом використання розробленого методу оцінки апріорної вірогідності безпечного плавання судна стислим маршрутом для вибору безпечної траєкторії руху судна.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 12.12.2018 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 14.02.2019 р.) та Херсонською державною морською академією (акт про впровадження від 22.02.2019 р.) для підготовки курсантів та студентів, компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 04.03.2019 р.), Філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 06.09.2019 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт про впровадження від 18.06.2019 р.), в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувач виконав окремий підрозділ та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), в якій здобувачу належить окремий розділ.

Під час виконання дисертаційної роботи були отримані патенти на корисну модель:

- «Пристрій для інформаційного забезпечення лоцманської проводки морського судна» №78679. Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 25.03.2013, Бюл. №6;

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

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

## СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ворохобин И.И. Разработка теории и методов оценки повышения надежности судовождения: монография / И.И. Ворохобин / – Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 252 с; ISBN: 978-966-7591-78-6; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

2. Vorokhobin I. Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements / I. Vorokhobin, A. Golikov, O. Naichenia, V. Sikirin, V. Severin / Kaunas, Lithuania, 2020. ISSN 1822-296 X (print); ISSN 2351-7034 (online) – P. 707-710; внесок автора: перевірка застосування загального розподілу Пуассону з допомогою експериментальних даних похибок вимірювання, одержаних в натурних спостереженнях; [включена до МНБ: *Scopus, Google Scholar*].

3. Ворохобин И.И. Журнал лоцманской проводки / И.И. Ворохобин // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 22. – Одеса: «ВидавІнформ», 2013 – С. 76 – 85; ISSN 2306-5761; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

4. Ворохобин И.И. Документирование при планировании и выполнении лоцманской проводки / И.И. Ворохобин // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 23. – Одеса: «ВидавІнформ», 2014 – С. 45 – 55; ISSN 2306-5761; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

5. Ворохобин И.И. Процедура оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных водах / И.И. Ворохобин., В.В. Северин. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2014. – № 4 . – С. 119 – 126; внесок автора: визначення вірогідності безаварійного плавання судна в стислих водах; ISSN 2306-241X; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

6. Ворохобин И.И. Способы предупреждения аварийного происшествия при лоцманской проводке судов / И.И. Ворохобин // Проблеми інформаційних технологій: Зб. наук. праць / ХНТУ. Вип. 1(15). – Херсон: «Херсонський національний технічний університет», 2014 – С. 240 – 245; ISSN 1998-7005; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

7. Ворохобин И.И. Совершенствование структуры лоцманского навигационного устройства / И.И. Ворохобин // Водний транспорт: Зб. наук. праць / КДАВТ. Вип. 2(20). – Київ: «Київська державна академія водного транспорту ім. Петра Конашевича-Сагайдачного», 2014 – С. 41 – 47; ISSN 2226-8553; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

8. Бобыр В.А. Оценка эффективности судовых эргатических функций / В.А. Бобыр, И.И. Ворохобин // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник Вып. 32./ – Одеса: ОНМА, 2014 – С. 74 – 82; внесок

автора: спосіб аналітичної оцінки ефективності суднових ергатичних функцій; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

9. Соколенко В.И. Содержательные алгоритмы планирования пути движения судна в стесненных водах / В.И. Соколенко, И.И. Ворохобин // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 24. – Одеса: «ВидавІнформ», 2014 – С. 147 – 155; внесок автора: алгоритм планування маршруту судна в стислих водах, який управляє і контролює процес переміщення судна по траєкторії; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

10. Ворохобин И.И. Использование полиномов Эрмита в ортогональном разложении плотностей распределения погрешностей измерений навигационных параметров / И.И. Ворохобин, С.С. Данильченко // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С.55 – 64; внесок автора: використання поліномів Ерміту в ортогональному розкладанні щільності розподілу похибок вимірювань; ISSN 2306-241X; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

11. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев, Е.Е. Тюпиков, И.И. Ворохобин / Одеса: ОНМА, 2013. –246 С; внесок автора: спосіб визначення смуги руху судна на криволінійній траєкторії; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

12. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И.И. Ворохобин, В.В.Северин, Ю.В. Казак // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 25. – Одеса: «ВидавІнформ», 2015 – С. 40 – 47; внесок автора: математична модель оцінки вірогідності безаварійного плавання судна в стислих водах; ISBN 39.471; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

13. Ворохобин И.И. Количественная оценка безопасности судовождения / И.И. Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39; внесок автора: математична модель оцінки вірогідності безаварійного плавання судна в стислих водах; ISSN 1819-3293; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

14. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И.И. Ворохобин, Ю.В. Казак // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип. 26. – Одеса: «ВидавІнформ», 2016. – С. 60 – 64; внесок автора: модель формування похибок повороту за неточністю положення керма; ISBN 39.471; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

15. Ворохобин И.И. Повышение точности управления судном минимизацией ковариационной матрицы векториальной погрешности его поворота / И.И. Ворохобин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ «ОМА». – С. 29 – 32; ISSN 1819-3293 (print); ISSN 2415-3915 (on line); [включена до МНБ: *Google Scholar*].



16. Ворохобин И.И. Выражение плотности бокового отклонения судна от программной траектории движения при нормальном законе распределения / И.И. Ворохобин, В.В. Северин // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип. 26. – Одеса: «ВидавІнформ», 2016. – С. 56 – 59; внесок автора: загальний вираз щільності бокового відхилення судна від програмної траєкторії руху; ISBN 39.471; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

17. Ворохобин И.И. Определение эффективных координат судна при избыточных измерениях / И.И. Ворохобин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ «ОМА». – С. 25 – 29; ISSN 1819-3293 (print); ISSN 2415-3915 (on line); [включена до МНБ: *Google Scholar*].

18. Ворохобин И.И. Преобразование векториальной погрешности в погрешность бокового отклонения / И.И. Ворохобин, В.В. Северин // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип. 27. – Одеса: «ВидавІнформ», 2017. – С. 71 – 76; внесок автора: залежність похибки бокового відхилення судна від векторіальної позиційної похибки; ISBN 39.471; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

19. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И.И. Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Эксплуатация морского транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 3 (84). – С. 65 – 69; ISSN 1992-8181 (print) внесок автора: загальний вираз щільності розподілу векторіальної похибки повороту судна; [включена до МНБ: *РИНЦ; Google Scholar*].

20. Ворохобин И.И. Ортогональное разложение плотности распределения погрешностей навигационных измерений в ряд Грама-Шарлье типа А / И.И. Ворохобин, В.Е. Сикирин, И.Ю. Фусар // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – № 2(17). – 2017. – С. 14 – 20; внесок автора: використання поліномів Ерміту в ортогональному розкладанні щільності розподілу похибок вимірювань; ISSN 2313-4763; [включена до МНБ: *Index Copernicus, РИНЦ; Google Scholar*].

21. Ворохобин И.И. Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины / И.И. Ворохобин, Ю.В. Казак, В.В. Северин // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017. – С.101 – 104; внесок автора: способи зниження величини траєкторної векторіальної похибки повороту судна; ISSN 2308-5258 (print); ISSN 2308-1996 (on line); [включена до МНБ: *Index Copernicus, Global Impact Factor, Inno Space Scientific Journal Impact Factor, ISI (International Scientific Indexing) Impact Factor, Google Scholar, Directory of Research Journal Indexing, Ulrichs Web Global Serials Directory, Union of International Associations Yearbook, Scribd, Academia.Edu*].

22. Ворохобин И.И. Эффективность применения полиномов Эрмита для ортогонального разложения плотностей распределения навигационных

погрешностей / И.И. Ворохобин, В.Е. Сикирин, И.Ю. Фусар // *East European Scientific Journal*, №11 (27), 2017, volume 1. – С. 25 – 31; внесок автора: процедура визначення ефективності використання поліномів Ерміту для ортогонального розкладання щільності розподілу похибок вимірювань; ISSN 2468-5380; [включена до МНБ: *Index Copernicus, Cosmos Impact Factor, International Scientific Indexing, Google Scholar*].

23. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Д.В. Астайкин, В.Е. Сикирин, И.И. Ворохобин, Б.М. Алексейчук – Saarbrucken, Deutschland / Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с; ISBN 978-3-330-07701-0; внесок автора: застосування виразу щільності розподілу векторіальної позиційної похибки для формування алгоритму розрахунку ефективних координат судна при надмірних вимірюваннях; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

24. Ворохобин И.И. Универсальный способ стохастического описания случайных погрешностей навигационных измерений / И.И. Ворохобин, В.Г. Алексишин, И.Ю. Фусар // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип. 28. – Одеса: «ВидавІнформ», 2018 – С. 42 – 47; ISSN 2306-5761; внесок автора: розробка загального способу стохастичного опису випадкових похибок; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

25. Ворохобин И.И. Анализ возможности применения ортогонального разложения плотности смешанных законов распределения погрешностей полиномами Эрмита / И.И. Ворохобин, И.Ю. Фусар, Б.М. Алексейчук // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(18), Issue: 158, 2018. – С. 84 – 88; внесок автора: використання поліномів Ерміту в ортогональному розкладанні щільності розподілу похибок вимірювань; ISSN 2308-5258 (print); ISSN 2308-1996 (on line); [включена до МНБ: *Index Copernicus, Global Impact Factor, Inno Space Scientific Journal Impact Factor, ISI (International Scientific Indexing) Impact Factor, Google Scholar, Directory of Research Journal Indexing, Ulrichs Web Global Serials Directory, Union of International Associations Yearbook, Scribd, Academia.Edu*].

26. Ворохобин И.И. Повышение точности обсервации судна при избыточных измерениях / И.И. Ворохобин, И.Ю. Фусар // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 24. Одесса: НУ «ОМА». – С. 27 – 33; ISSN 1819-3293; внесок автора: дослідження залежності точності координат судна від способу їх розрахунку; [включена до МНБ: *Index Copernicus, Google Scholar*].

27. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / И.И. Ворохобин, Ю.В. Казак, В.В. Северин – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. – 240 с; ISBN 978-613-9-87198-8; внесок автора: використання інтенсивностей випадкових потоків аварійних подій в якості характеристики надійності судноводіння; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

28. Ворохобин И.И. Плотность распределения векториальной позиционной погрешности при избыточных измерениях и ее применение. / И.И. Ворохобин // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(22), Issue: 186, 2018. – С. 95 – 99; ISSN 2308-5258 (print); ISSN 2308-1996 (on line); [включена до МНБ: *Index Copernicus, Global Impact Factor, Inno Space Scientific Journal Impact Factor, ISI (International Scientific Indexing) Impact Factor, Google Scholar, Directory of Research Journal Indexing, Ulrichs Web Global Serials Directory, Union of International Associations Yearbook, Scribd, Academia.Edu*].

29. Ворохобин И.И. Влияние закона распределения погрешности бокового отклонения на вероятность безопасного прохождения судном стесненного маршрута / И.И. Ворохобин // *East European Scientific Journal*, №5 (33), 2018, volume 1. – С. 30 – 36; ISSN 2468-5380; [включена до МНБ: *Index Copernicus, Cosmos Impact Factor, International Scientific Indexing, Google Scholar*].

30. Ворохобин И.И. Определение места судна при избыточных измерениях применением ортогонального разложения плотности распределения погрешностей навигационных измерений / И.И. Ворохобин, Д.В. Астайкин // *Austria - Science*, Issue: – 11, – 2018. – С. 39 – 44; внесок автора: спосіб визначення місця судна використанням ортогонального розкладання щільності розподілу похибок вимірювань; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

31. Ворохобин И.И. Свойство ортогональности полиномов Эрмита плотности распределения закона Гаусса ненормированной погрешности навигационных измерений / И.И. Ворохобин // *Austria – Science*, Issue: –16, –2018. – С. 49 – 56; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

32. Ворохобин И.И. Влияние способа расчета координат судна при избыточных измерениях на их точность / И.И. Ворохобин, И.Ю. Фусар // *Austria – Science*, Issue: 26, 2019. – С. 3 – 8; внесок автора: дослідження залежності точності координат судна від способу їх розрахунку; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

33. Ворохобин И.И. Применение метода максимального правдоподобия для оценки эффективных координат судна / И.И. Ворохобин // *East European Scientific Journal*, №2 (42), 2019, volume 1. – С. 10 – 16; ISSN 2468-5380; [включена до МНБ: *Index Copernicus, Cosmos Impact Factor, International Scientific Indexing, Google Scholar*].

34. Ворохобин И.И. Проверка статистических гипотез распределения погрешностей измерения навигационных параметров / И.И. Ворохобин // *East European Scientific Journal*, №4 (44), 2019, volume 3. – С. 11 – 18; ISSN 2468-5380; [включена до МНБ: *Index Copernicus, Cosmos Impact Factor, International Scientific Indexing, Google Scholar*].

35. Ворохобин И.И. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности

смещения / И.И. Ворохобин // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип. 30. – Одеса: «ВидавІнформ», 2020. – С. 57 – 65; ISSN 2306-5761; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

36. Патент на корисну модель № 78679 України. Пристрій для інформаційного забезпечення лоцманської проводки морського судна / А.С. Мальцев, В.В. Голиков, І.І. Ворохобін, В.І. Соколенко /, опубл. 25.03.2013, Бюл. №6. внесок автора: алгоритм оцінки точності проводки судна стислим маршрутом.

37. Патент на корисну модель № 134690 України. Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден / І.І. Ворохобін, І.О. Бурмака, Е.М. П'ятаков /, опубл. 27.05.2019, Бюл. №10. внесок автора: пристарій забезпечений блоком розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції методом максимальної правдоподібності.

38. Патент на корисну модель № 134691 України. Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні / І.І. Ворохобін, І.О. Бурмака, Е.М. П'ятаков /, опубл. 27.05.2019, Бюл. №10 / внесок автора: пристарій містить блок формування масиву завданого розміру із значень пеленгу та дистанції між суднами і параметрів їх руху та розрахунку високоточних значень вимірюваних величин масиву методом ортогонального розкладання щільності розподілу похибки вимірювання.

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

39. Gladkykh I. Development Prospects of the Ukrainian Section of the Shipping Route E-40 / I. Gladkykh, A. Golikov, I. Vorokhobin, M. Kulakov // Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Scientific Conference «Transport Means 2020», September 30 – October 02, 2020 – Online Conference Kaunas, Lithuania, 2020. ISSN 1822-296 X (print); ISSN 2351-7034 (online) – P. 860-864; внесок автора: спосіб розрахунку приросту радіусу дуги водного шляху на криволінійних ділянках каналу; [включена до МНБ: *Scopus, Google Scholar*].

40. Ворохобин И.И. Оценка возможной вероятности обеспечения безаварийного плавания судна в стесненном районе / И.И. Ворохобин, В.В. Северин // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв : МУК, 2014. – С. 43 – 45; внесок автора: визначення вірогідності безаварійного плавання судна в стислих водах; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

41. Ворохобин И.И. Ортогональное разложение плотностей распределения погрешностей измерений полиномами Эрмита / И.И. Ворохобин, С.С. Данильченко // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18–19 листопада 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 25 – 27; внесок автора: процедура визначення ефективності використання поліномів Ерміту для ортогонального розкладання щільності розподілу похибок вимірювань; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

42. Ворохобин И.И. Определение вероятности обеспечения безаварийного плавания судов в стесненных районах / Ворохобин И.И., Северин В.В., Казак Ю.В. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18–19 листопада 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 161 – 163; внесок автора: процедура визначення вірогідності безаварійної проводки судна стислим маршрутом; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

43. Ворохобин И.И. Формирование процедуры оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах / И.И. Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)», – 26–28 травня 2015, Херсон: ХДМА, – С. 99 – 101; внесок автора: процедура визначення вірогідності безаварійної проводки судна стислим маршрутом; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

44. Ворохобин И.И. Определение закона распределения бокового отклонения судна / И.И. Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Матеріали науково-методичної конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні», - 19-20 листопада 2015, Одеса: НУ «ОМА», – С. 117 – 118; внесок автора: процедура визначення закону розподілу похибки бокового відхилення судна; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

45. Ворохобин И.И. Связь плотности погрешности бокового отклонения с плотностью векториальной позиционной погрешности. / И.И. Ворохобин, В.В. Северин // Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека», – 16–17 листопада 2016, Одеса: НУ «ОМА», – С. 58 – 59; внесок автора: залежність похибки бокового відхилення судна від векторіальної позиційної похибки; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

46. Ворохобин И.И. Формальная модель оценки навигационной безопасности судовождения / И.И. Ворохобин // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)», 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 119 – 121; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

47. Ворохобин И.И. Двумерная плотность распределения вероятностей векториальной погрешности / И.И. Ворохобин // Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інновацій-

ні технології на транспорті (MINTT-2017)», 23–25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 98 – 100; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

48. Ворохобин І.І. Векториальна погрешність і її щільність розподілення. / І.І. Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», 17–18 травня 2017 р., Миколаїв, НУК, 2017, – С. 25 – 26; внесок автора: щільність розподілу векторіальної похибки; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

49. Ворохобин І.І. Стохастическое описание случайных погрешностей навигационных измерений. / І.І. Ворохобин, І.Ю. Фусар // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології: інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація», 16–17 листопада 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 123 – 125; внесок автора: процедура стохастичного опису випадкових похибок навігаційних вимірювань; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

50. Ворохобин І.І. Учет избыточных линий положения при определении координат судна / І.І. Ворохобин // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 2017 – Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 49 – 51; ISSN 5672-2605; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

51. Ворохобин І.І. Розложение плотности распределения обобщенного закона Пуассона в ряд Грама-Шарлье типа А / І.І. Ворохобин // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)», 29–31 травня 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 107 – 109; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

52. Ворохобин І.І. Оценка эффективности обсервованных координат при использовании ортогонального разложения плотности погрешностей навигационных измерений / І.І. Ворохобин // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології: інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація», 15–16 листопада 2018 – Одеса: НУ «ОМА», – 2018. – С. 113 – 116; [включена до МНБ: *Google Scholar*].

## АНОТАЦІЯ

**Ворохобін І. І.** Розвиток теорії і методів оцінки та підвищення надійності судноводіння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 – Річковий та морський транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2020.

Розглянута апіорна оцінка вірогідності безпечної проводки судна стислим маршрутом з використанням двовимірної щільності позиційної похибки. Запропоновано альтернативний метод визначення вірогідності безпечного плавання в стислих умовах за допомогою одновимірної щільності розподілу похибки бічного відхилення судна.

Проведено порівняння двовимірної і одновимірної моделей оцінки вірогідності проводки судна заданим маршрутом за допомогою імітаційного моделювання.

Визначено залежність безпеки судноводіння від векторіальної похибки управління судном. Одержана залежність величини систематичної похибки управління від вибору динамічної моделі поворотності судна.

Розглянуто питання оцінки точності визначення місця судна при надмірних лініях положення.

Для різних законів розподілу похибок ліній положення при їх надмірній кількості одержані аналітичні вирази розрахунку ефективності обсервованих координат судна у разі їх обчислення методом найменших квадратів.

Одержані аналітичні вирази для розрахунку ефективних координат судна методом максимальної правдоподібності.

Проведено розробку універсального методу розрахунку ефективних координат судна при надмірних вимірюваннях.

Здійснено аналіз результатів натурних спостережень і імітаційного моделювання ефективності змішаних законів розподілу.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, підвищення надійності судноводіння, вірогідність безпечного плавання судна, траєкторна похибка повороту судна, ефективність обсервованих координат судна, метод максимальної правдоподібності, ортогональний розклад щільності розподілу, результати натурних спостережень.

## АННОТАЦІЯ

**Ворохобин И. И.** Развитие теории и методов оценки и повышения надежности судовождения. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на получение научной степени доктора технических наук по специальности 05.22.13 – навигация и управление движением (271 – Речной и морской транспорт). – Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, 2020.

Рассмотренная априорная оценка вероятности безопасной проводки судна стесненным маршрутом с использованием двумерной плотности позиционной погрешности. Предложен альтернативный метод определения вероятности безопасного плавания в стесненных условиях с помощью од-

номерной плотности распределения погрешности бокового отклонения судна. Проведено сравнение двумерной и одномерной моделей оценки вероятности проводки судна заданным маршрутом с помощью имитационного моделирования.

Определена зависимость безопасности судовождения от векториальной погрешности управления судном. Получена зависимость величины систематической погрешности управления от выбора динамической модели поворота судна.

Рассмотрен вопрос оценки точности определения места судна при избыточных линиях положения. Для разных законов распределения погрешностей линий положения при их избыточном количестве полученные аналитические выражения расчета эффективности обсервованных координат судна в случае их вычисления методом наименьших квадратов.

Полученные аналитические выражения для расчета эффективных координат судна методом максимальной правдоподобности.

Проведена разработка универсального метода расчета эффективных координат судна при избыточных измерениях.

Осуществлен анализ результатов натуральных наблюдений и имитационного моделирования эффективности смешанных законов распределения.

**Ключевые слова:** безопасность судовождения, повышение надежности судовождения, достоверность безопасного плавания судна, траекторная погрешность поворота судна, эффективность обсервованных координат судна, метод максимального правдоподобия, ортогональное разложение плотности распределения, результаты натуральных наблюдений.

## THE SUMMARY

**Vorokhobin I.I.** Development of the Theory and Evaluation methods and Increase of Navigation Reliability. Qualified scientific paper on the manuscript rights. Dissertation to obtain the Doctor of Technical Sciences degree, specialty 05.22.13 – Navigation and Traffic Control (271 – River and Marine Transport). National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, 2020.

The results of the analysis from the study about the impact of the accuracy of ship's navigation through a confined route on the safety of navigation were presented. There were considered a priori evaluations of possibility of safe ship's navigation by confined route with the use of two-dimensional positional error density. The alternative method of determination of possibility of safe navigation is offered in the confined conditions through one-dimensional error distribution density of lateral deviation. The dependence of one-dimensional error distribution density of ship's lateral deviation on the two-dimensional positional error density was revealed. There was offered a determination procedure of



basic parameters for probability evaluation of safe ship's navigation in the given congested area.

There was received a dependence of probability evaluation of safe ship's navigation of the confined route from the distribution law of lateral deviation error. Comparison of two-dimensional and one-dimensional models of probability evaluation of safe ship's navigation through the given route was conducted by simulation modeling. There was proposed a forming method of the given route by an electronic chart.

The dependence of safety navigation on the vector error of ship's handling was identified. There was represented a formation model of vector error navigation, which is the sum of systematic and casual components. The dependence of value of systematic error of ship's handling on the choice of dynamic model of ship turning-ability was obtained. The determination procedure of error value of ship's handling was received, taking into account the dynamic model of ship's rotation motion.

There was developed a safety navigation evaluation procedure of ship's turn and offered the choice of optimal route of passage by the reflection of navigation situation with information about safety of navigation. In this paper it can be found results of value evaluation of trajectory error of ship's turn as a result of in situ observations.

The question about the evaluation of exact ship's position at the surplus lines of position was considered. There was determined an analytical equation for the density of vector error for determination of the ship's position. It was also shown that the density of vector error depends on the number of lines of position, distribution of their error and angles between directions of their gradients.

For different distribution law of position lines errors at their surplus number there were received analytical equations of efficiency calculation of ship's coordinates, which were examined in the case of their calculation with the use of smaller squares method.

There were obtained analytical equations for the calculation of effective ship's coordinates with the use of maximum likelihood method, which provides their minimum covariance matrix.

Development of universal calculation method of effective ship's coordinates at the excessive measuring was held. For such purpose the orthogonal decomposition of error density of measurements disposal in the row of Gram-Charlier type A was applied. There was also shown the possibility of orthogonal decomposition of irregular density.

The analysis of error density of navigation parameters was performed with its orthogonal decomposition for mixed laws of the first and second types, and also for the generalized law of Poisson. There was developed the method of the use of orthogonal decomposition of error density of lines of position for ship's coordinate's determination. Effectiveness evaluation of ship's studied coordinates was offered by the method which was received.

**Keywords:** safety of navigation, increase of navigation reliability, likelihood of safety navigation, trajectory error of ship's turn, efficiency of ship's coordinates, method of maximum likelihood, orthogonal decomposition of density disposal, results of in situ observations.

Підп. до друку 22.02.2021. Формат 60x84/16. Папір офсет.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,33.  
Тираж 100 пр. Зам. № И21-02-38

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