

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Жуков Дмитро Сергійович

УДК 656.61.086.16-044.57-049.5(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

МІНІМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(271 – Морський та внутрішній водний транспорт)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. С. Жуков

Науковий керівник **Астайкін Дмитро Вадимович,**
канд. техн. наук, доцент

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Жуков Д.С. Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 – Морський та внутрішній водний транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2025.

Згідно з попереднім аналізом літератури по проблемі підвищення безпеки судноводіння, основними напрямками рішення цієї проблеми являються застосування сучасних засобів безпечного судноводіння та підвищення точності визначення місця судна і оцінка безпеки судноводіння в стислих умовах.

В результаті проведеного аналізу було встановлено, що одним із важливих аспектів забезпечення безаварійності судноводіння є підвищення точності і надійності судноводіння в стислих водах, тому дисертаційне дослідження присвячене розробці методу синтезу та відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі.

В технологічній карті дисертаційного дослідження визначена його мета та сформульована головна задача, яка розділена на три незалежні складові задачі. Запропоновано гіпотезу дисертаційного дослідження та показано, що одержано наукові результати дисертаційної роботи по рішенням кожній із незалежних складових задач.

Значущість і практичну цінність дисертаційного дослідження визначає можливість впровадження практичних рекомендацій, одержаних в дисертаційній роботі, а також запропоновано формулювання загального наукового положення роботи.

Також представлено методику рішення головної задачі дисертаційного дослідження, як покрокове вирішення складових задач роботи, для чого застосовано сучасні методи аналітичного аналізу та проведено імітаційне моделювання, яке підтвердило коректність одержаних результатів дисертації.

В основній частині дисертаційного дослідження розглянуто ризики навігаційних аварій і їх вплив на безпеку судноводіння, а також доцільність їх врахування.

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

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

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

При повороті судна виникає систематична векторіальна похибка відносно прогнозованої позиції виходу судна на новий курс, причиною якої є різниця між реальною траєкторією і прогнозованою, що визначається за моделлю обертального руху судна. Показано, що значення систематичної

векторіальної похибки при плаванні в стислих водах є суттєвим, і ризик навігаційних аварій, який виникає в зв'язку з поворотом судна, необхідно враховувати.

Розглянуто міри по зниженню негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій. Запропоновано різні способи покращання безпеки судноводіння, які знижують результати дії основних ризиків.

Показано, що урахування похибок навігаційних вимірювань можливе шляхом формування поля точності, яке створюється навігаційними орієнтирами. Для характеристики поля точності запропоновано скалярний показник.

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

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

Мінімізація систематичної похибки повороту судна досягається в разі вибору відповідної моделі обертального руху судна для прогнозу траєкторії його повороту. Приведені аналітичні вирази для розрахунку моменту часу початку повороту судна.

Наведено опис імітаційної моделі, що дозволяє відображати в графічному режимі навігаційну ситуацію з розглянутими параметрами на електронній карті, причому при імітаційному моделюванні надається можливість використання однієї з трьох електронних карт підходу до портів. На електронну карту наносяться позиції судна та однієї цілі. Є можливість вибору безпечного маршруту руху судна, враховуючи візуалізацію значень параметрів навігаційної ситуації. Імітаційна модель дозволяє проводити

програвання обраного маршруту проходження з реєстрацією значень показника точності поля.

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

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

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

У дисертаційній роботі:

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

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

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

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

Дисертаційному дослідженню притаманне практичне значення, яке полягає у можливості упровадження його результатів при розробці судових навігаційних системах для підвищення точності судноводіння.

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

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

ANNOTATION

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

According to a preliminary analysis of the literature on the problem of improving navigation safety, the main directions for solving this problem are the use of modern means of safe navigation and increasing the accuracy of determining the location of the vessel and assessing the safety of navigation in confined waters.

As a result of the analysis, it was found that one of the important aspects of ensuring the safety of navigation is to increase the accuracy and reliability of navigation in confined waters, therefore, the dissertation research is devoted to the development of a method for synthesizing and displaying the navigation situation in the ship's information system.

The technological map of the dissertation research defines its goal and formulates the main task, which is divided into three independent component tasks. The hypothesis of the dissertation research is proposed and it is shown that the scientific results of the dissertation work were obtained by solving each of the independent component tasks.

The significance and practical value of the dissertation research is determined by the possibility of implementing practical recommendations obtained in the dissertation work, and the formulation of the general scientific position of the work is also proposed.

Also presented is the methodology for solving the main problem of the dissertation research, as a step-by-step solution of the component tasks of the work, for which modern methods of analytical analysis were applied and simulation modeling was carried out, which confirmed the correctness of the obtained results of the dissertation. The main part of the dissertation research considers the risks of navigational accidents and their impact on the safety of navigation, as well as the feasibility of taking them into account.

It is shown that errors in navigation measurements lead to risks of accidents, which create uncertainty in the position of the vessel relative to underwater obstacles and contribute to the possibility of a vessel colliding with them. Random

errors and their stochastic characteristics are considered in detail. The risks of the threat of a vessel colliding with an oncoming target are considered, the relative position and parameters of the movement of which, taking into account other factors, determine the level of risk of the threat of collision. The concept of a safe area of the vessel and its possible forms are given. The parameters that characterize each of the considered forms of a safe area of the vessel are given.

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

When a vessel turns, a systematic vectorial error occurs relative to the predicted position of the vessel's entry into a new course, the cause of which is the difference between the real trajectory and the predicted one, which is determined by the model of the vessel's rotational motion. It is shown that the value of the systematic vectorial error when sailing in compressed waters is significant, and the risk of navigational accidents that arise in connection with the vessel's turn must be taken into account.

Measures to reduce the negative consequences of the impact of significant risks of navigational accidents are considered. Various methods of improving navigational safety are proposed that reduce the results of the main risks.

It is shown that taking into account navigational measurement errors is possible by forming an accuracy field created by navigational landmarks. A scalar indicator is proposed to characterize the accuracy field.

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

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

Minimization of the systematic error of the vessel's turn. is achieved in the case of choosing an appropriate model of the vessel's rotational motion to predict the trajectory of its turn. Analytical expressions are given for calculating the moment of the beginning of the vessel's turn.

A description of the simulation model is given, which allows displaying in a graphical mode the navigation situation with the considered parameters on an electronic map, and during simulation modeling it is possible to use one of three electronic maps of the approach to ports. The positions of the vessel and one target are plotted on the electronic map. It is possible to choose a safe route for the vessel, taking into account the visualization of the values of the parameters of the navigation situation.

The simulation model allows playing the selected route with the registration of the values of the field accuracy indicator. The results of simulation modeling for three navigation areas are given, in which navigation situations were specified and their graphical display of their parameters, by which safe routes for the vessel's further movement.

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

The scientific novelty of the study lies in the development of a new method of synthesis and display of the navigation situation in the ship's information

system, which is distinguished by the fact that it allows for a comprehensive consideration of the impact of significant risks of navigational accidents on navigation safety, ensuring the choice of a safe vessel route in limited conditions.

In the dissertation work:

- for the first time, a method for comprehensive consideration of key risks of navigation accidents was proposed, which is distinguished by the possibility of simultaneous consideration of navigational, technical and human factors, which allows to reasonably increase the level of navigation safety in limited conditions;

- for the first time, a method for forming an accuracy field for several landmarks was developed, which is distinguished by taking into account the spatial location and errors in determining navigational landmarks, which allows to more reliably assess the navigational support of the vessel's route;

- the procedure for taking into account the lateral displacement of the vessel due to a maneuver was improved, which is distinguished by a refined method for calculating the impact of course changes and external factors, which allows to increase the accuracy of predicting the trajectory of movement;

- methods for displaying the navigation situation using an electronic map were further developed, which are distinguished by the integration of the results of complex processing of navigational information, which allows to increase the informativeness and efficiency of decision-making by the ship's navigator.

The dissertation research has an inherent practical significance, which lies in the possibility of implementing its results in the development of ship navigation systems to increase the accuracy of navigation.

The practical results of the dissertation research were implemented by the Limited Liability Company "A – Technologies" (implementation act dated 06/05/2025) and the Limited Liability Company "Transport Security Systems Ukraine" (implementation act dated 06/05/2025). The materials of the dissertation research are used in the educational process when teaching the discipline "Preventing collision at sea and use of Radar and ARPA" (act dated 14/05/2025).

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Жуков Д. С. Комплексне врахування небезпечних чинників для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах. *Судноводіння*, 2025. Вип. 37, С. 78–91. DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.78-91.
2. Жуков Д. С., Алексійчук Б. М. Формування поля точності обсервації судна за декількома орієнтирами. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. Вип. 1 (30). С. 69–79. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.069-079.
3. Burmaka I., Zhukov D. Dependence of the maximum-permissible distance of ships' convergence on the shape of the ship's safe domain. *The TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2025. Vol. 19. P. 265–268. DOI: 10.12716/1001.19.01.31.
4. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Development of the ship model on the basis of an artificial neural network. *IAMU Journal*. 2007. Vol. 5, No.1. P. 23–31.

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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

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

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ	20
1.1. Аналіз літературних джерел присвячених проблемі попередження зіткнень суден та вдосконаленню методів управління судном	20
1.2. Аналіз проблеми забезпечення точності та надійності судноводіння ..	31
1.3. Висновки до першого розділу дисертації	36
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	38
2.1 Вибір напрямку дисертаційного дослідження.....	38
2.2 Формування технологічної карти наукового дослідження	40
2.3 Методика виконання дисертаційного дослідження	45
2.4. Висновки до другого розділу дисертації.....	47
РОЗДІЛ 3 РИЗИКИ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ І ЇХ ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ.....	49
3.1. Ризики аварій, які виникають через похибки навігаційних вимірювань	49
3.2. Загроза зіткнення	57
3.3. Вплив маневрування судна на навігаційну безпеку.....	61
3.4. Систематична векторіальна похибка повороту судна	73
3.5. Висновки до третього розділу	81
РОЗДІЛ 4 МІРИ ПО ЗНИЖЕННЮ НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ВПЛИВУ СУТТЄВИХ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ.....	83
4.1. Урахування похибок навігаційних вимірювань	83
4.2. Компенсація ризику можливого зіткнення	96
4.3. Зниження бокового зміщення судна після маневру.....	104
4.4. Мінімізація систематичної векторіальної похибки повороту судна ...	114

	14
4.5. Висновки до четвертого розділу	120
РОЗДІЛ 5 КОМПЛЕКСНЕ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ СУТТЄВИХ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ РОЗРОБКОЮ СУДОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	122
5.1. Алгоритм відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі.....	122
5.2. Імітаційне моделювання відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі.....	128
5.3. Відображення навігаційної ситуації на електронній карті підходів до порту Феодосія.....	146
5.4. Відображення навігаційної ситуації на електронній карті підходів до порту Севастополь.....	154
5.5. Можливості подальшого вдосконалення суднової інформаційної системи.....	161
5.6. Висновки до п'ятого розділу дисертації	177
ВИСНОВКИ.....	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181
ДОДАТОК А.....	195
ДОДАТОК Б	197

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення безаварійності судноводіння сприяє зниженню шкоди людському життю, навколишньому середовищу та майну, що є найбільш важливою проблемою безпеки мореплавання.

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

У свідомості судноводія ризики навігаційної ситуації формуються в єдиний образ, що комплексно відображає положення судна відносно програмної траєкторії, наявні навігаційні загрози, рухомі об'єкти, стан навігаційного обладнання тощо; саме на його основі здійснюється вибір рішення. Обсяг поточної інформації значний і іноді перевищує когнітивні можливості судноводія, що підвищує ризик аварії. Отже, необхідно розробити методи всебічного врахування факторів навігаційної небезпеки та їх подання у формі, доступній для належного сприйняття судноводієм з метою прийняття рішень, які забезпечують безаварійну навігацію. Це є темою даної роботи і становить актуальний та перспективний науковий напрям.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження було проведено згідно з положеннями Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р із змінами, внесеними згідно з постановою КМ України від 28.04.2023 № 416), Указу Президента України №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». Дослідження по темі дисертаційної роботи також проводилися в рамках планів наукових досліджень національного університету "Одеська морська академія" за держбюджетною темою № ДР

0123U101463, «Удосконалення методів управління та експлуатації суден», в якій здобувач виконав окремий підрозділ.

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

Як наукову гіпотезу дисертаційного дослідження висунуто припущення, що безпеку судноводіння можна підвищити шляхом графічного відображення в судновій навігаційній системі додаткової інформації, яка характеризує навігаційну ситуацію з позицій можливого ризику виникнення аварії.

Головну задачу дисертації методами теорії дослідження операцій було розділено на три незалежні складові задачі:

1. Формалізація впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
2. Аналіз заходів щодо зниження негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
3. Розробка бортової навігаційної інформаційної системи комплексного урахування ризиків навігаційних аварій.

Об'єктом дослідження дисертації є безпека судноводіння в стислих районах плавання.

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

Методи дослідження. Для рішення поставлених в роботі задач було використано методи:

- системного аналізу при обґрунтовані теми дисертаційного дослідження та формуванні його методологічного забезпечення;

- дослідження операцій для розділення головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- теорії вірогідності для розробки способу формування поля точності обсервації судна;
- теоретичної механіки для розробки процедури зменшення бокового зміщення судна після маневру.

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

У дисертаційній роботі:

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

Практичне значення отриманих результатів полягає в їх можливому впровадженні під час розробки суднових навігаційних систем з метою підвищення точності судноводіння.

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

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу здобувач виконав самостійно: ним проведено аналіз літературних джерел по основним напрямкам проблеми забезпечення безпеки судноводіння та проведено методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розроблено метод комплексного урахування впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, також запропоновано спосіб формування поля точності, створеного декількома орієнтирами та скалярний показник поля та впроваджено результати роботи в виробничий процес. З наукових праць, опублікованих ним у співавторстві, в дисертаційній роботі використані лише ті положення, які належать автору особисто: спосіб формування поля точності, яке створюється навігаційними орієнтирами [120, 122], процедура визначення допустимої дистанції зближення для домену еліптичної форми [121], методу вибору оптимального режиму керування судном за несприятливих погодних умов [116, 123-125].

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

- XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2025» (Херсон, 28–30 травня 2025 р.);

- 16-й Міжнародній науковій конференції «Морська навігація та безпека морських перевезень (TransNav-2025)» (м. Гдиня, Республіка Польща, 11–13 червня 2025 року);

- щорічних Міжнародних конференціях Міжнародної асоціації морських університетів AGA IAMU (2008, 2010, 2016 рр.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 8 наукових праць (з них 2 одноосібно), в тому числі в наукових профільних виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України (кат. Б) – 2 наукові статті [119, 120]; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 2 наукові статті [121, 125] (1 з них індексована у наукометричній базі Scopus); в збірниках матеріалів наукових конференцій – 4 тези доповідей [116, 122-124] (2 з них індексовані у наукометричній базі Scopus).

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ

1.1. Аналіз літературних джерел присвячених проблемі попередження зіткнень суден та вдосконаленню методів управління судном

Питанню забезпечення безаварійності судноводіння присвячено значну кількість наукових робіт у галузі безпеки мореплавання. Ця проблема є багатокомпонентною: кожен її аспект спрямований на зниження впливу суттєвого чинника аварійності.

Одним із найважливіших чинників аварій є зіткнення суден; для їх попередження розроблено різні системи прийняття рішень, яким присвячено значну кількість наукових робіт. У роботі [1] проведено аналіз основних методів урахування вимог Конвенції про Міжнародні правила запобігання зіткненню суден на морі 1972 року (МПЗЗС-72) у ситуаціях небезпечного зближення суден, що рекомендуються для систем розходження. Аналіз показав, що застосування МПЗЗС-72 ускладнюється нечітким визначенням низки термінів і понять. Багато спеціалістів вважають, що вибір значень параметрів розходження в ситуаціях небезпечного зближення має виконувати сама система.

У роботі [2] запропоновано систему вибору маневру розходження, що відповідає вимогам МПЗЗС-72. Передбачається її реалізація та тестування на автономному безпілотному надводному судні, а також випробування на тренажерах. У роботі підкреслено важливість програмного забезпечення для запобігання зіткнень суден.

Як показано в роботах [3, 4], задача вибору оптимального маневру розходження в ситуації небезпечного зближення має високу складність:

процес управління рухом судна багатовимірний і нестационарний, а сама задача носить ігровий (тобто стратегічний) характер і вимагає урахування дій інших суден.

У роботі [5] запропоновано гібридну тришарову систему розходження для автономних апаратів, що враховує вимоги Правил 8 та 13–17 МПЗЗС-72. Система містить планувальний модуль для розрахунку маневру розходження з урахуванням положень Конвенції. У роботі [6] запропоновано застосування методів диференціальної різницевої гри для опису процесу розходження суден.

У статті [7] запропоновано метод максимальної зміни курсу і мінімальної зміни швидкості для ситуацій розходження з кількома небезпечними суднами. У роботі підкреслюється його ефективність при координації маневрів для розходження кількох суден одночасно.

У роботі [8] наведено теоретичне обґрунтування системи ухилення від зіткнення для автономних суден. Запропоновано алгоритм вибору маневру розходження та сформульовано вимоги до автономного суднового управління з урахуванням факторів, що впливають на процес розходження. Зазначено, що дослідження проблеми автоматизації управління судном проводяться в класичному та комп'ютерному варіантах: класичний передбачає застосування математичних моделей, комп'ютерний — методів штучного інтелекту.

Результатам аналізу основних методів автоматичного вибору маневру розходження суден присвячені статті [9, 10].

У роботі [11] запропоновано графічні інструменти для полегшення вибору, оцінки та коригування дій з попередження зіткнення в ситуаціях з рухомими та нерухомими перешкодами. При цьому робляться припущення, що такі ситуації не є екстремальними, а параметри руху цілі є постійними або відома їхня майбутня зміна. Розглянуто розходження комбінованим Z-маневром ухилення (зміна курсу й швидкості в одній точці та повернення

до вихідних значень в іншій точці) і однієї комбінованої дії (зміна курсу й швидкості у вибраній точці).

Застосовано діаграми, що містять вісім зон дій та спеціальні позначки цілей у момент їх максимального наближення до власного судна. Враховуючи МПЗЗС-72 і добру морську практику, ці зони розташовано в порядку пріоритету застосування. Для формування діаграм використано результати перерахунку множини можливих варіантів маневру.

У статті [12] зазначено, що посадки на міліну та зіткнення становлять найбільшу частку морських аварій, незважаючи на увагу до морської освіти, підготовки та вдосконалення сенсорних систем. У документі наведено короткі статистичні дані про людський фактор як провідну причину інцидентів на морі та про випадки неправильного тлумачення МПЗЗС-72.

У роботі також розглянуто архітектуру системи підтримки прийняття рішень для вибору відповідної стратегії розходження при виявленні ризику потенційного зіткнення. Архітектура складається з кількох модулів, інтегрованих з даними сенсорів, що відстежують стан навколишньої навігаційної зони (наприклад: модулі виявлення й відстеження цілей, оцінки ризику, генерації та оцінки маневрів, а також інтерфейс оператора).

Система може допомагати вахтовим помічникам у процесі розходження суден, надаючи пропозиції, що відповідають вимогам чинних правил запобігання зіткненням. Вона призначена для використання на судах незалежно від рівня їхньої автоматизації і використовує Автоматичну ідентифікаційну систему (AIC) як основне джерело даних. Як показали отримані результати, коректне застосування запропонованої системи може суттєво зменшити кількість аварій, пов'язаних зі зіткненнями.

Особливостям розходження суден способом зміщення на лінію, паралельну шляху руху, присвячена монографія [13].

У роботі [14] представлено спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями з графічним відображенням вибраного маневру

на моніторі. У роботі [15] запропоновано розробку судової інформаційної системи попередження зіткнень з урахуванням навігаційних перешкод з використанням електронних карт.

Розробка і використання інформаційних систем імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, що залежать від кута кладки руля і числа обертів двигуна, відображені в роботах [16–22].

Робота [16] підкреслює необхідність удосконалення комп'ютерних систем для безпечного судноплавства, які базуються на прогнозних моделях руху. Надмірне спрощення таких моделей ускладнює їх використання для миттєвого відображення змін руху при корекції обертів двигуна або кута пера керма; натомість більш точні моделі забезпечують адекватне відтворення криволінійної траєкторії.

Розробка інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями відображена в роботі [17]; моделі враховують залежність руху судна від кута кладки керма та обертів двигуна. Система забезпечує сучасний підхід до планування маневру й поточний контроль виконання заданого маневру. Під час маневрування вона може відображати задані маневри одночасно з фактичним рухом судна та індикувати прогнозовану траєкторію, визначену за реальними вхідними даними від судових датчиків.

Очевидно, що запропонована система вирішує пряму задачу — відображення прогнозованої траєкторії за заданими параметрами маневру. Водночас актуальною залишається зворотна задача: визначення параметрів попереднього маневру за заданою програмною траєкторією руху. Іншими словами, необхідно розрахувати момент початку повороту та його тривалість при заданому куті кладки пера руля, які забезпечать вихід судна в потрібну точку.

Питання ідентифікації судових моделей маневрування розглянуто в роботі [18]. Ці моделі можуть бути використані для дослідження

маневреності судна, проектування систем управління рухом та вдосконалення систем управління судновими тренажерами. У роботі створено нелінійну модель маневрування на основі аналізу гідродинаміки судна. Для оцінювання параметрів моделі застосовано теорію ідентифікації систем; запропонований алгоритм базується на розширеному фільтрі Калмана. Для ідентифікації в експерименті отримувалися вхідні та вихідні дані системи, для чого використовувалися циркуляція судна та зигзагоподібний маневр, виконані на імітаторі управління. Запропонований алгоритм усуває похибки, внесені в процесі вимірювання.

Робота [19] описує інтелектуальну систему для прогнозування руху судна, яка моделює процес навчання автономного блоку керування на базі штучної нейронної мережі. Блок на підставі вхідних сигналів обчислює параметри маневру в умовах стислих вод і забезпечує безперервний моніторинг і прогнозування руху на заданий час уперед. Прогнози виводяться як попередження для судноводія щодо потенційних загроз.

Математичні моделі зміни курсу судна під час повороту без урахування часу переключання пера керма наведено в роботі [20]. У ній представлено три моделі різного ступеня адекватності реальному процесу повороту та встановлено відповідність математичних моделей результатам натурних експериментів на конкретних суднах. Отримано аналітичні вирази для розрахунку тривалості обох фаз повороту методом простих ітерацій. Також повідомляється про розробку навігаційної інформаційної системи для забезпечення маневрування суден, яка містить модель розрахунку параметрів повороту. За заданими відрізками програмної траєкторії та величиною зміни курсу між ними система розраховує момент початку повороту судна і його траєкторію з урахуванням кута переключки стерна та динамічних характеристик судна.

У роботах [21,22] проаналізовано, як врахувати показники поворотності судна при обчисленні параметрів маневру. Запропоновано методи корекції

запланованої криволінійної траєкторії в навігаційній інформаційній системі з метою досягнення заданої точності виконання повороту.

У роботах [23,24] показано, що підсистеми повної системи проводять управління одного із підпроцесів руху судна, який може бути описаний відповідними диференціальними рівняннями кінематики або динаміки судна. Причому управління можливо наступними підпроцесами: стабілізація судна на курсі або траєкторії; корегування швидкості судна; точне управління судном на маленьких швидкостях в порту; управління групи буксирів; динамічна стабілізація судна при бурінні або положення танкера при вантажних операціях в морі.

Функціональний аспект системи відповідає певному фактичному стану устаткування. Вимоги, що збільшуються, до безпеки судноводіння вимушують встановлювати об'єднані системи навігації і управління судами. Покращуючи управління судном, ці системи збільшують безпеку судноводіння, знижуючи ризик втрати судна, вантажу і підвищуючи ефективність перевезень.

При розробці автоматизованих засобів вибору маневру використовують МПЗЗС-72, місцеві норми та добру морську практику. Суттєвою проблемою є трансформація людських інструкцій і нечетких положень МПЗЗС-72 у формалізовані правила й алгоритми для систем автоматичного уникнення зіткнень.

Наразі активно дискутується питання, чи слід вносити зміни в МПЗЗС-72, щоб їх можна було застосувати до морських автономних надводних суден (МАНС), і яким чином це робити. У статтях [25,26] наведено огляд основних запропонованих підходів для автоматичного розв'язання ситуацій небезпечного зближення суден та наведено результати їх аналізу.

Результати формального опису МПЗЗС-72 у частині маневрування, визначено області взаємних обов'язків суден, ситуації з ризиком надмірного

зближення, і способи поведінки відображено у роботі [27]. Розглянуто взаємодії суден в умовах нормальної та зниженої видимості. Виявлено нестандартні ситуації, які не передбачені МПЗЗС-72.

У роботі [28] представлено каталог маневрів для розходження, що сприяє спрощеному визначенню дій суден відповідно до МПЗЗС-72.

У роботі [29] наведено підхід до попередження зіткнень між кількома суднами, який передбачає максимальну зміну курсу за умови мінімальних коригувань швидкості і показав високу ефективність для розв'язання відповідної задачі.

Питання формалізації положень МПЗЗС-72 і доброї морської практики для комп'ютерних додатків розглянуто в статті [30]. У роботі порівнюються та аналізуються методи формалізації знань для підтримки прийняття рішень у ситуаціях, пов'язаних із небезпечним зближенням суден.

У роботі [31] описано тришарову гібридну систему запобігання зіткнень для автономних надводних апаратів, що відповідає правилам 8 та 13–17 МПЗЗС-72. До складу системи входять високорівневий планувальний модуль, який формує оптимальну траєкторію розходження суден на основі моделі прогнозуючого управління з урахуванням положень МПЗЗС-72, та модуль короткострокового управління для запобігання аварійним ситуаціям відповідно до МПЗЗС-72.

У роботі наведено результати опитування судноводіїв щодо майбутнього МПЗЗС-72 у контексті впровадження МАНС. У статті описано підхід до організації руху суден у відповідності з МПЗЗС-72, а також архітектуру системи, яку планується тестувати на тренажерах та на автономному безпілотному надводному судні; окремо розглядається програмне забезпечення для запобігання зіткненням і зниженню пов'язаних з цим ризиків.

У першій частині дослідження [34] представлено концепцію інтелектуального цифрового рульового для суден майбутнього. Друга частина

дослідження описує систему попередження зіткнень на основі нечіткої логіки, що підтримує роботу цифрового рульового, а третя — аналіз відповідності між людськими та системними рішеннями в критичних сценаріях для виявлення потенційних відмов.

У роботі [35] виконано попередній аналіз практичного застосування нечіткої логіки для формалізації положень МПЗЗ-72. У роботі [36] запропоновано огляд літератури щодо систем уникнення зіткнень, проведено оцінку їх відповідності МПЗЗ-72 у різних сценаріях та видокремлено існуючі недоліки й шляхи їх усунення.

У статті [37] наведено підсумки проєкту Rolls-Royce "MAchine eXecutable Collision regulations for Marine Autonomous Systems": формалізовано ключові положення МПЗЗ-72 і норми хорошої морської практики та випробувано алгоритми для оцінки ситуацій і підбору маневрів.

У роботі [38] розглянуто й проаналізовано основні підходи врахування МПЗЗ-72 у системах уникнення зіткнень. Дослідження показало, що для формалізації правил, місцевих норм і рекомендацій хорошої морської практики в МАНС потрібні більш точні визначення ряду термінів і певні зміни нормативної бази. Додатковою складністю є відсутність у МПЗЗ-72 кількісних показників, тому система має самостійно обирати значення параметрів безпеки для різних умов навігації

Запропоновані методи для автоматичного вирішення небезпечних ситуацій мають як недоліки, так і переваги. Єдина думка відносно методів та алгоритмів попередження зіткнень для автономних суден поки що не існує.

Послідовність дій для уникнення зіткнень із суднами називають стратегією розходження, а множину безпечних можливих рішень — репрезентативною.

Аналіз методів визначення стратегій розходження із суднами у ситуаціях із рухомими і нерухомими перешкодами, що базуються на різних концепціях, проведено у роботах [39-42]. Для знаходження ефективних

рішень в умовах небезпечного зближення суден можуть застосовуватись різні методи. Наприклад, наближені процедури дискретної оптимізації, включно евристичні алгоритми: "поведінки рою бджіл", "генетичний", "бактеріального пошуку їжі", "поведінки колонії мурашок", "випадкового дерева, яке швидко досліджує" тощо.

Робота [43] представляє підхід до визначення маневру розходження в ситуації з кількома суднами, який використовує алгоритм розподіленої локальної оптимізації. Стаття [44] містить процедуру моделювання траєкторії уникнення зіткнення за допомогою генетичного алгоритму.

У роботах [45, 46] представлено підхід на основі алгоритму "мурашиної колонії" для планування маршруту з уникненням зіткнень. У роботі [47] запропоновано вирішення задачі розходження за допомогою алгоритму "рою бджіл".

У роботі [48] представлено простий біологічно орієнтований алгоритм для запобігання зіткнень. У статті [49] описано підхід до розв'язання задачі розходження, що поєднує використання нечіткої логіки та розподіленого алгоритму перебору. В роботі [50] розглянуто алгоритм "випадкового дерева, яке швидко досліджує" як вибір оптимального маневру розходження з допомогою розглянуто в роботі.

У роботі [51] запропоновано чисельний метод вибору стратегії розходження при наявності кількох небезпечних суден. Наведено відповідні аналітичні вирази та приклади використання отриманого методу.

У роботі [52] проаналізовано повні моделі маневрування суден і властивості лінійних моделей маневрування; наведено нові результати з теорії лінійної динаміки судна.

Стаття [53] містить теорію управління динамічними системами з змінними параметрами з точки зору синергетики; у ній проаналізовано архітектуру нейромереж, описано класичні системи управління і продемонстровано використання нечіткої логіки для управління.

Метод синтезу пристроїв системи управління динамічним об'єктом описаний в роботі [54], в якій на підставі рішення системи лінійних рівнянь пропонуються процедури визначення параметрів передавальних функцій, що відповідають змішаним вимогам.

У роботі [54] описано метод синтезу пристроїв системи управління динамічним об'єктом; на підставі розв'язання системи лінійних рівнянь запропоновано процедури визначення параметрів передавальних функцій, що відповідають змішаним вимогам.

У роботі [55] наведено методику оцінки особливостей управління судном під час руху фарватером. Методика враховує скупчення суден на фарватері, маневрені характеристики судна, конфігурацію фарватеру, впливи вітру й течії, а також наявність вільної акваторії. Дослідження проведено на тренажері з управління судном; у роботі подано методику та результати експериментів і запропоновано оцінку управління при плаванні фарватером.

У статті [56] розглянуто формування моделі керованого руху судна, що пов'язане зі значними труднощами при моделюванні складних умов плавання, таких як нерегулярна хитаவிця, мілководдя, поривчастий вітер тощо. Це особливо важливо для тренажерів з маневрування та при використанні математичної моделі судна для проектування водних шляхів.

У роботі [57] наведено алгоритм керування кермовим приводом в умовах нестабільності його характеристик, таких як величина зони нечутливості, люфт і швидкість обертання гвинта. За цим алгоритмом формується керуючий сигнал у момент надходження команди на перекладання керма від головної керуючої програми авторульового. За результатами попередніх експериментів визначається момент зняття керуючого сигналу, після чого фіксуються необхідні параметри. Отримана інформація характеризує ситуацію і зберігається в базі даних.

У роботі [58] розглянуто дві концепції управління суднами в ситуації небезпечного зближення. Першою є локально-незалежна концепція, згідно з

якою кожне судно самостійно приймає рішення про маневр розходження в рамках регламентуючої системи попередження зіткнень (нині — МПЗЗС-72 щодо маневрування суден), виходячи зі ситуації зближення з кожною з цілей і не враховуючи зближення між самими цілями.

Друга концепція — повне управління системою зближення суден: зовнішній керівник (диспетчер) аналізує всі попарні ситуації зближення й формує єдину стратегію розходження із взаємно узгодженими маневрами.

Для обох підходів до управління суднами в умовах небезпечного зближення створено методи виявлення оптимальних безпечних стратегій розходження з урахуванням навігаційних ризиків і динаміки суден. Запропоновані методи пройшли імітаційну перевірку за допомогою комп'ютерного моделювання.

Локально-незалежне управління в умовах небезпечного зближення залишається домінуючим методом розходження суден — воно склалося історично як засіб запобігання зіткненням, тож основна увага науковців зосереджена на його розвитку.

У роботах [59–61] запропоновано формалізацію процесу розходження суден як протистояння інтересів щодо економічності руху. Першу спробу багатокритеріальної формалізації наведено в [59], де застосовано методи оптимального управління з урахуванням вимог МПЗЗС-72. Розглянута система включає модель динаміки судна та алгоритм пошуку безпечного маневру; модель використовується для прогнозування руху під впливом збурень і керуючих дій, а за заданим критерієм обчислюються керуючі впливи для безпечного розходження з урахуванням формалізованих вимог МПЗЗС-72.

Теорія позиційних диференційно-різницевих ігор відкрила можливість формалізувати процес розходження як ігрову взаємодію, через що початкову модель істотно доповнено — деталі викладено в роботах [60, 61].

Згадана модель описує динаміку судна й цілей аналітично: поточний стан подається фазовим вектором і змінюється за диференціальними рівняннями руху. Пошук оптимальної стратегії розходження перекладається в терміни лінійного програмування, що вимагає апроксимації (лінійаризації) нелінійних обмежень.

Робота [62] аналізує проблему безпечного розходження з позиції типів взаємодії; встановлено, що взаємодія проявляється під час небезпечного зближення й визначає взаємні обов'язки. Запропоновано формалізацію бінарної координації за правилами МППЗС-72 та стратегію екстреного розходження при надмірному зближенні й невизначеності дій інших суден.

1.2. Аналіз проблеми забезпечення точності та надійності судноводіння

Проблема забезпечення точності та надійності судноводіння розглянута у багатьох роботах, присвячених тематиці безпеки мореплавання.

У роботі [63] проаналізовано підходи до оцінки точності визначення місцезнаходження судна за допомогою Системи глобального позиціонування (GPS) на основі статистичних даних. Виявлено, що припущення про нормальний (Гаусовий) розподіл випадкових похибок широти й довготи не підтверджується в достатній мірі статистичними даними.

В роботі [64] показано, що при визначенні місцеположення рухомого об'єкта за допомогою GPS похибки коригуються диференціальними методами. Установлено, що зі збільшенням відстані від базової станції поправки можуть бути недостатніми. Показано, що похибки зростають із відстанню між приймачем диференціальної глобальної системи позиціонування (DGPS) і базовою станцією: на кожні 150 км відстані похибка зростає приблизно на 1 м. Дослідження також виявили, що реальна похибка менша за

теоретично очікувану й становить близько 0,22 м на кожні 100 км відстані від станції відліку.

В працях [65, 66] описано підхід для оцінки безпеки судноплавства при проходженні короткого маршруту: на основі електронної карти формалізуються межі маршруту й розраховується ймовірність безаварійного проходження. У роботі [67] враховано розподіл похибок бокового відхилення від траєкторії руха судна.

У роботі [68] запропоновано оцінювати точність визначення місцеположення судна за орієнтирами шляхом формування на електронній карті поля точності, замість використання маршрутних графіків точності [69]; це забезпечує можливість вибору найбезпечнішої траєкторії.

За результатами натурних спостережень (роботи [70, 71]) встановлено, що розподіл похибок вимірювань навігаційних параметрів не підкоряється нормальному закону. У [72, 73] обґрунтовано застосування узагальненого розподілу Пуассона для моделювання залежних випадкових величин.

В роботі [74] обґрунтовано застосування ортогонального розкладання щільності розподілу похибок навігаційних вимірювань для розв'язання задачі локалізації судна в умовах наявності надмірних ліній положення.

Для моделювання випадкових похибок навігаційних вимірювань у роботі [75] розглянуто змішані закони двох типів. Робота [76] демонструє, що розподіли похибок вимірювань відстаней і пеленгів, отриманих за допомогою Радіолокаційної станції (РЛС), часто відповідають змішаним законам першого та другого типу.

В роботі [77] сформульовано та отримано аналітичні вирази залежності дисперсії обсервації від геометричного фактора при розподілах похибок за нормальним законом та за змішаними законами першого й другого типу; досліджено шляхи підвищення точності локалізації через додаткові лінії положення(ЛП), і оптимізацію геометричного фактору.

Публікація [78] містить опис електронної інформаційної системи фарватеру (ARGO), реалізованої телеметричними службами Федерального міністерства водного транспорту Німеччини; система інтегрує електронні карти, радіолокаційні зображення та батиметричні дані й відображає їх на моніторі для оперативного інформування екіпажу суден.

В роботі [79] проаналізовано застосування розрахованих поправок станції в районі порту Щецин для DGPS; експериментальні результати підтверджують доцільність їх врахування при оцінці позиції та підвищення точності навігації.

В роботі [80] розглянуто питання точності координат визначення місця судна, які розраховані методом найменших квадратів, у разі надмірних вимірів. Показано вплив суттєвих чинників на точність координат визначення місця судна.

У працях [81, 82] проаналізовано ситуації відхилення закону розподілу похибок від нормального та показано, що оцінки спостережуваних координат, отримані методом найменших квадратів, не є ефективними в таких умовах.

У роботі [83] проаналізовано навігаційні обмеження для входу в гавань, розташовану на відкритому морському узбережжі, у штормових умовах; встановлено ризик зіткнення з хвилеломом внаслідок відхилень від проєктної траєкторії та запропоновано процедуру розробки індексів оцінки безпеки, основану на натурних дослідженнях руха судна.

У роботі [84] шляхом аналізу гістограм натурних спостережень встановлено вимоги до функції щільності випадкових похибок вимірювань; запропоновано моделі формування нормального розподілу, змішаних розподілів та узагальненого закону Пуассона.

Аналіз натурних спостережень показав, що вибірки похибок, отримані при спостереженні тривалістю менше 8 годин, підпорядковуються нормальному закону; для добових або дво-добових вибірок — змішаним

законам; для більш тривалих інтервалів — узагальненому пуассонівському закону розподілу.

Робота [85] досліджує закони розподілу похибок навігаційних вимірювань і оцінює вплив кількості ліній положення та їх точності на дисперсію спостережуваних координат; показано також, як закон розподілу похибок і застосовані методи обчислення впливають на точність координат.

У роботі [86] виведено аналітичні формули для оцінювання ефективності оцінок координат судна методом найменших квадратів за наявності надлишкових ліній положення при застосуванні законів розподілу похибок, що відрізняються від нормального; результати підкріплено комп'ютерним моделюванням.

У роботі проаналізовано 12 вибірок випадкових похибок, отриманих у натурних спостереженнях; шляхом перевірки статистичних гіпотез визначено закони розподілу ймовірностей, переважна частина яких не є нормальним розподілом.

Публікація досліджує застосування ортогонального розкладання для щільності розподілу похибок навігаційних вимірювань із використанням поліномів Ерміта; наведено математичні властивості поліномів для гаусівської щільності та виведено явні формули розкладання відносно нормованого й ненормованого нормального закону за допомогою ортогональних поліномів Ерміта.

Порівняння нормованої щільності з її ортогональними розкладаннями використано для оцінки ефективності ортогонального розкладання щільності розподілу випадкових похибок навігаційних вимірювань. Аналіз показав, що максимальна ефективність досягається, коли розкладання містить лише один член.

У якості прикладу досліджено щільність узагальненого пуассонівського розподілу та її представлення в ортогональному базисі поліномів Ерміта;

доведено хорошу збіжність розгорнення і можливість його застосування замість безпосередньої функції щільності похибок.

В роботі [87] виконано імітаційне моделювання для оцінювання ефективності координат судна при надмірних вимірюваннях, розв'язуваних методом найменших квадратів, за умови змішаного закону розподілу похибок; отримано значення ефективності як функції суттєвого параметра розподілу та підтверджено їх збіжність із результатами аналітичних розрахунків.

У роботі [88] розглянуто змішані закони розподілу та узагальнений пуассонівський закон як моделі випадкових похибок (робота). Порівняння нормованих щільностей за однакових значень ексцесу виявило ідентичність цих щільностей за цілих значень параметра змішаного закону, не менших за шість.

В роботі [89] викладено теоретичні основи випадкових похибок навігаційних вимірювань. Роботи [90, 91] присвячено дослідженню властивостей цих похибок, а в роботі [92] встановлено залежність надійності навігації від точності контролю положення судна.

У роботі [94] викладено новий підхід до моделювання випадкових величин навігаційних вимірювань, який відрізняється від моделі Карла Гауса, що обґрунтовує нормальний закон розподілу. Унаслідок цього в судноводінні почали розглядати гіпотези про змішані закони розподілу випадкових похибок вимірювань навігаційних параметрів, відмінні від гаусового . Експериментальні дані підтверджують гіпотезу про змішаний розподіл похибок: гістограми мають надлишкову кількість спостережень у крайніх інтервалах, що не узгоджується з гаусовим законом. Недоліком змішаних законів розподілу є те, що вони не є стабільними розподілами, що обмежує їхнє застосування для опису систем із залежними випадковими величинами.

У роботах [96, 102] розглянуто спосіб забезпечення високої точності позиціонування суден у стислих районах плавання за допомогою

кореляційної навігації. У проведено аналіз вибірок похибок вимірювань, який виявив кращу узгодженість із теоретичними розподілами, що відрізняються від нормального.

У роботах [116, 119–125], виконаних автором одноосібно або в співавторстві, розглядається комплексне врахування небезпечних чинників та методика розробки бортової комп'ютерної інформаційної системи синтезу навігаційної ситуації для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах.

Загалом проведений аналіз літературних джерел свідчить про стале зростання інтересу до питань статистичного опису похибок і побудови моделей, що адекватно враховують реальні навігаційні умови. Окрему увагу дослідники приділяють питанням оцінки якості вимірювань у динамічних системах судноводіння, де фактор часу набуває визначального значення. Узагальнення результатів показує, що сучасна тенденція розвитку методів оцінювання точності полягає у переході від спрощених до змішаних і гібридних статистичних моделей. Це відкриває можливості для створення більш стійких алгоритмів фільтрації й прогнозування координат судна в реальному часі. Застосування таких методів дозволяє підвищити надійність навігаційних розрахунків, особливо у складних гідрометеорологічних умовах або при роботі в районах із підвищеною щільністю руху.

1.3. Висновки до першого розділу дисертації

У розділі здійснено огляд літератури та системний аналіз основних напрямів забезпечення безпеки судноводіння в стислих водах.

За результатами аналізу виділено основні напрями: запобігання зіткнень суден, особливо у стислих водах; підвищення точності визначення місця судна в таких районах плавання; розвиток методів управління судном;

застосування сучасних інформаційно-керуючих технологій для забезпечення безпеки судноводіння; розробка бортових навігаційно-інформаційних систем.

У першому розділі роботи проведено аналіз концепцій розходження суден і вибору оптимального маневру, які застосовують методи оптимального керування та концепції повного зовнішнього керування.

Також було проведено огляд наукових джерел, присвячених проблемі забезпечення точності й надійності управління судном в стислих районах навігації.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір напрямку дисертаційного дослідження

Проведений у попередньому розділі огляд джерел засвідчив, що для гарантування безпеки судноводіння в обмежених районах плавання потрібно вирішити такі ключові питання:

- запобігання зіткнень суден;
- забезпечення необхідної точності позиціювання судна в стислих водах;
- вдосконалення методів управління судном;
- підвищення безпеки управління судном шляхом впровадження сучасних інформаційно-керувальних технологій і засобів та розроблення судових навігаційно-інформаційних систем.

Гарантування безпеки управління судном вимагає застосування сучасних інформаційних та обчислювальних технологій для формування й візуалізації навігаційної картини. Доцільно реалізувати інтегроване відображення ключових факторів ризику аварій для оперативного моніторингу рівня загрози та вибору безпечної траєкторії руху.

Із розвитком інформаційно-комп'ютерних технологій оброблення навігаційної обстановки поступово стало більш залежним від технічних засобів. Впровадження електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС), супутникових систем позиціонування, АІС та застосування засобів автоматичної радіолокаційної прокладки (ЗАРП) дозволило комплексно формувати й відтворювати навігаційну обстановку.

Основою цього став електронний план, на який наносять поточну позицію судна, а також місцезнаходження й параметри руху навколишніх

об'єктів, отримані як від САРП, так і від АІС. Таке графічне представлення значно полегшує судноводієві прийняття оптимальних рішень для безаварійного управління судном.

Проведений аналіз показав, що питання синтезу й відображення навігаційної ситуації вивчені недостатньо, хоча вони істотно впливають на безпеку суднового руху; тому ця тематика є актуальною й перспективною, і їй присвячено дане дисертаційне дослідження.

Математичну модель відображення навігаційної ситуації в умовах обмеженого плавання можна створити після розв'язання низки завдань. Передусім слід аналітично окреслити, як значення ключових чинників впливають на величини відповідних ризикових показників, що можуть спричинити аварійні ситуації.

Точність визначення положення судна в районі плавання визначається числом орієнтирів, обраних для контролю його місцезнаходження, розташуванням цих орієнтирів відносно одне одного та якістю вимірювань навігаційних параметрів.

Ширина смуги лінійного зміщення судна, що виникає внаслідок появи інерційних похибок після маневрування судна, визначається типом використовуваного гірокомпасу, широтою плавання судна та характером виконаного маневру.

Розподіл ймовірностей зіткнення суден залежить від точнісних характеристик виміру відносних параметрів руху, відносної позиції суден та співвідношення їх швидкостей. Характеристики суднової зони безпеки в першу чергу визначаються параметрами поворотності та його інерційністю. Одним з найбільш важливих питань дослідження є форма графічного представлення розрахованих характеристик навігаційної ситуації та спосіб вибору безпечного маршруту руху з урахуванням ситуації, що реалізувалася. Перевірка коректності отриманих у дисертаційній роботі результатів

потребує створення імітаційної моделі щодо оцінки ефективності запропонованого методу відображення навігаційної ситуації.

Таким чином, **об'єктом даного дослідження** є безпека судноводіння в стислих районах плавання.

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

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначається необхідністю розробки методу відображення навігаційної ситуації у зв'язку з високим рівнем аварійності суден у обмежених умовах плавання та недостатньою адекватністю існуючих методів відображення навігаційної ситуації.

Очікувана наукова новизна дослідження полягає у розробці нового методу синтезу та відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі при плаванні суден у стиснених умовах, а також вивчення негативного впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння.

Економічний ефект може бути отриманий за рахунок мінімізації втрат, спричинених аваріями під час руху в стислих умовах плавання.

Імітаційне моделювання розробленої теоретичної частини запропонованого наукового дослідження забезпечує можливість його реалізації.

2.2 Формування технологічної карти наукового дослідження

Достовірні результати та коректне рішення головного завдання роботи дозволяє отримати методологічне забезпечення досліджень, що проводяться в дисертації, технологічна карта якого представлена на рис. 2.1.

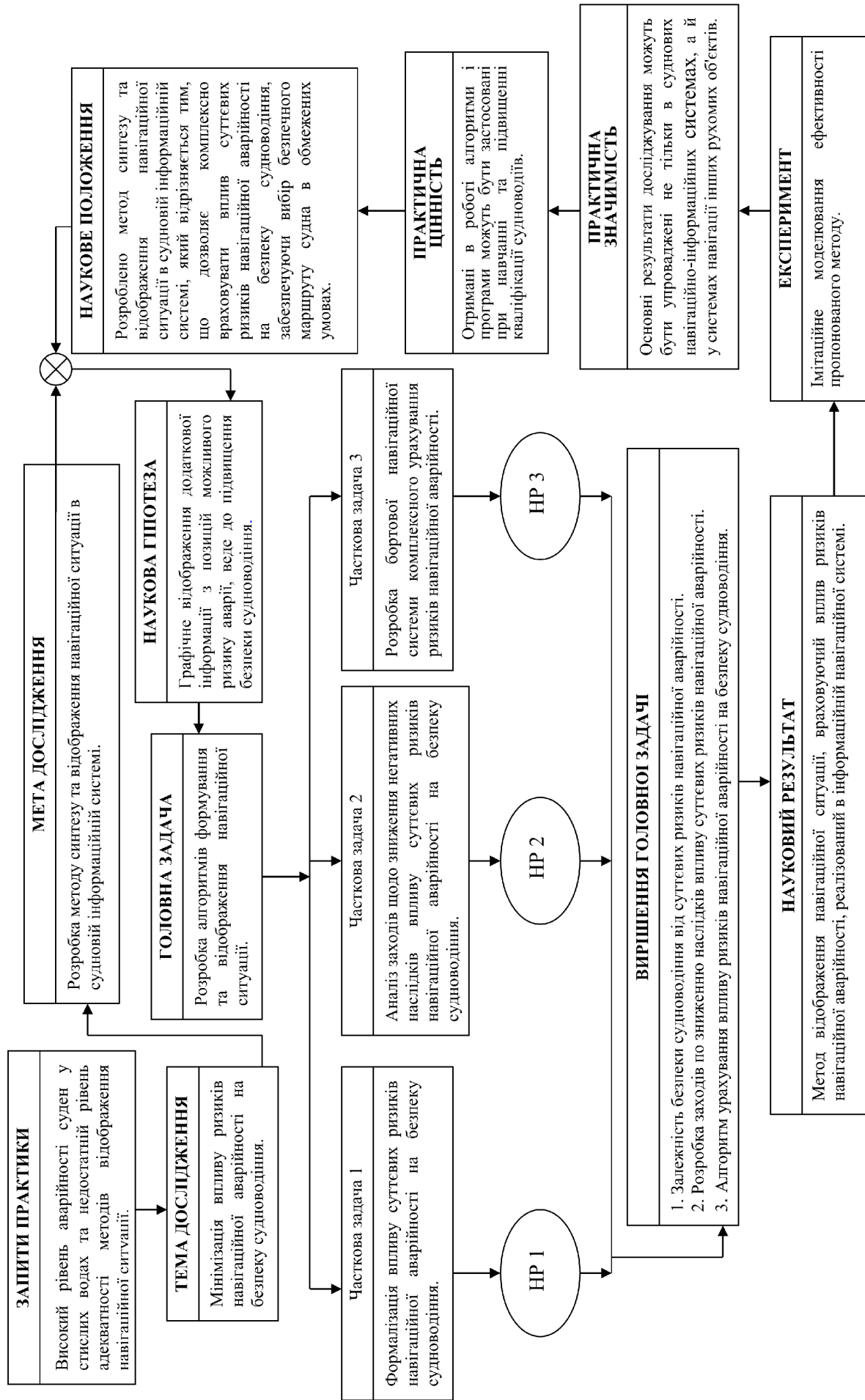


Рисунок 2.1. Технологічна карта дисертації

Серед сучасних практичних викликів — підвищена аварійність суден у стислих водах і недосконалі методи відображення навігаційної ситуації, які визначають актуальність теми дисертації та зумовлюють проведення наукового дослідження з обраної тематики.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці методу синтезу та відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі, та була обрана наступна робоча гіпотеза наукового дослідження, яка формулюється так: "Графічне відображення в судновій навігаційній системі додаткової інформації, яка характеризує навігаційну ситуацію з позицій можливого ризику аварії, веде до підвищення безпеки судноводіння".

Головним завданням дисертаційного дослідження є синтез алгоритму формування та відображення навігаційної ситуації. Використовуючи методи теорії дослідження операцій, розв'язання головного завдання дисертації знаходиться шляхом її декомпозиції на три складові завдання, що дозволяють знайти загальне рішення.

Головне завдання дисертаційного дослідження, як показав аналіз, доцільно подати наступними трьома складовими незалежними задачами:

- формалізація впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
- аналіз заходів щодо зниження негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
- розробка бортової навігаційної інформаційної системи комплексного урахування ризиків навігаційних аварій.

Вирішення першої складової задачі передбачає попереднє виявлення суттєвих ризиків навігаційних аварій, що впливають на безпеку судноводіння і можуть бути графічно відображені в навігаційній інформаційній системі. Це потребує застосування методів системного аналізу. Оскільки до таких факторів належать розподіл точності визначення положення судна в районі плавання та можливе лінійне зміщення судна відносно програмної траєкторії,

що виникає через інерційні похибки гірокомпасів після маневру, коректне розв'язання задачі вимагає використання методів теорії ймовірностей і методів дослідження гіроскопічних систем. Також слід розглянути вибір оцінки ймовірності зіткнення суден, що вимагає, крім теорії ймовірностей, залучення методів теорії управління судном. У цьому завданні розглядається питання визначення параметрів безпечної суднової зони, який вирішується з допомогою методів динаміки твердого тіла.

Друга складова задача дослідження передбачає розгляд можливості зниження впливу ризику навігаційних аварій, який виникає від похибок навігаційних вимірювань, на безпеку судноводіння.

Необхідно опрацювати методику візуалізації поля похибок у районі руху судна, застосувавши кольорове відтворення значень критерію точності та прозоро наклавши це поле на електронну карту. Така наочна індикація точності позиціювання судна доповнює модель навігаційної обстановки

Для формування поля точностей обсервації судна необхідно вибрати чисельний (скалярний) показник, що характеризує величину векторіальної похибки в довільній позиції поля.

Також потрібно розробити спосіб зниження впливу ризиків навігаційних аварій через появу бокового лінійного зміщення і позиційної похибки при використанні пеленга для обсервації, який виникає внаслідок маневру судна. Слід розглянути процедуру мінімізації систематичної векторіальної похибки повороту судна.

Розв'язання третьої складової задачі передбачає опис алгоритму відображення навігаційної ситуації з урахуванням впливу істотних ризиків навігаційних аварій, тобто аналітичний опис оцінки параметрів навігаційної ситуації. У третій задачі передбачено імітаційне моделювання результатів дисертаційного дослідження, для чого передбачено розробку імітаційної моделі та використано методи імітаційного моделювання. Вирішення

кожного з перерахованих приватних завдань є відповідним самостійним науковим результатом (НР1, НР2 та НР3), які формулюються таким чином:

- науковий результат НР1 першої приватної задачі є залежністю безпеки судноводіння від суттєвих ризиків навігаційних аварій;
- науковим результатом другого приватного завдання НР2 є розробка заходів щодо зниження негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
- результат НР3 третього приватного завдання полягає у розробці методу синтезу та відображення навігаційної ситуації, що комплексно враховує вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій.

У дисертаційній роботі наведено результати проведеного експерименту, який полягав у проведеному імітаційному моделюванні, яке підтвердило коректність та достовірність отриманих у роботі результатів. Для експериментальної частини довелося розробити імітаційної комп'ютерної моделі, якою є програмний продукт, написаний мовою високого рівня.

Отримані в дисертації теоретичні та експериментальні результати підтвердили наукову гіпотезу щодо можливості графічного відображення в судовій навігаційній системі додаткової інформації, що характеризує навігаційну ситуацію з позицій можливого ризику аварії та веде до підвищення безпеки судноводіння.

Практична значущість дисертаційного дослідження полягає в тому, що запропонований у роботі метод може бути використаний не тільки в судових навігаційно-інформаційних системах, а й у системах навігації інших рухомих об'єктів. Результати дисертаційної роботи мають значну практичну цінність, – алгоритми та програми, отримані у дисертації, доцільно використовувати при розробці судових навігаційно-інформаційних систем, для підвищення безпеки судноводіння шляхом вибору безпечних маршрутів плавання з урахуванням обмежених ділянок, у навчальному процесі та при підвищенні кваліфікації.

Наукові та експериментальні результати, отримані у дисертаційному дослідженні, дозволили визначити наукове положення дисертаційної роботи, що формулюється наступним чином.

Розроблено метод синтезу та відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі, який відрізняється тим, що дозволяє комплексно враховувати вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, забезпечуючи вибір безпечного маршруту судна в обмежених умовах з урахуванням факторів, які не відображаються в явному вигляді.

2.3 Методика виконання дисертаційного дослідження

Даний підрозділ присвячений стислому викладу методики проведення дисертаційного дослідження.

Насамперед слід виявити суттєві ризики навігаційних аварій та його впливом на безпеку судноводіння, сформулювати поняття навігаційної ситуації, і також параметрами, якими вона характеризується. Навігаційна ситуація має враховувати можливу точність визначення місця судна у районі його плавання. Чисельною характеристикою зазначеного параметра є міра точності контролю місця судна, що використовується в судноводінні, тобто еліпс похибок чи кругова похибка. Істотними факторами, що впливають на точність контролю місця судна, є число орієнтирів, обране для обсервації судна, співвідношення між їх позиціями (геометричний фактор) і точність вимірювання навігаційних параметрів. Тому необхідно знайти залежність обраного показника точності від перерахованих істотних факторів, що впливають на точність. Згадана залежність може бути отримана за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики.

Наступним ризиком навігаційних аварій, який необхідно враховувати, є лінійне зміщення судна щодо лінії програмного руху, що виникає під час його маневрування. При цьому характеристикою лінійного зміщення є можлива ширина смуги, що виникає від першого та другого максимальних зсувів.

Істотними параметрами у цьому випадку є характер маневрування судна і широта плавання, у якій відбувається маневр. Для виявлення залежності ширини смуги усунення істотних параметрів необхідно скористатися методами дослідження гіроскопічних систем.

Ще один аспект опису навігаційної обстановки — ширина суднового ходу, яка з'являється через відхилення судна від запрограмованої траєкторії на прямолінійних ділянках. Спочатку необхідно виявити умови, за яких урахування ширини суднового ходу є доцільним.

Для забезпечення безпечного плавання важливою обставиною є розташування оточуючих цілей щодо оперуючого судна та відображення положення судна щодо навігаційних небезпек. позиції та характеристик можливого небезпечного зближення судна з кожною з цілей у районі контролю. У зв'язку з цим актуальним є параметр навігаційної ситуації, що характеризує безпеку розходження судна з навколишніми цілями, причому чисельною характеристикою даного параметра доцільно вибрати розподіл ймовірностей зіткнення судна з ціллю по недопустимим щодо заданої мети курсам судна. розподілу ймовірностей зіткнення судна з ціллю від суттєвих факторів вимагає використання методів теорії ймовірностей та теорії управління.

Відображення навігаційної ситуації потребує універсального представлення значень її параметрів, які враховують вплив ризиків навігаційних аварій, у графічному вигляді на електронну карту району плавання судна. Тому необхідно визначити спосіб графічного представлення параметрів навігаційної ситуації, що дозволяє візуально оцінити рівень її небезпеки. Така візуальна оцінка потребує розробки способу вибору

безпечного маршруту плавання судна. Перевірка достовірності отриманих у дисертації теоретичних результатів щодо формування та відображення навігаційної ситуації в судновій навігаційно-інформаційній системі вимагає розробки імітаційної моделі, що дозволяє проводити відображення навігаційної ситуації та вибору безпечного маршруту плавання. Моделювання слід проводити, використовуючи різні початкові ситуації, генерація яких здійснюється шляхом варіації значень параметрів, що впливають на безпеку судноводіння.

2.4. Висновки до другого розділу дисертації

На базі проведеного аналізу існуючих підходів зниження ризику аварійності суден при плаванні в стислих водах у другому розділі дисертації було обґрунтовано напрямок дисертаційного дослідження, присвяченого проблемі підвищення безпеки судноводіння у стислих водах шляхом розробки способу графічного відображення поточної навігаційної ситуації з урахуванням впливу ризиків навігації. використовує електронні карти та інформацію з САРП (або АІС) про навколишні цілі. В окремому підрозділі глави проведено методологічне обґрунтування дослідження з теми дисертаційної роботи. Технологічна карта містить методи розв'язання поставлених у роботі задач і обґрунтування вибору цих методів при декомпозиції головної задачі на складові.

При цьому було визначено мету дисертаційного дослідження, його головне завдання, яке було піддано декомпозиції на три складові завдання. Було показано, що кожне з них може бути вирішено самостійно та отримано конкретний науковий результат, причому рішення головного завдання отримано за допомогою часткових рішень.

Практична цінність виконаного дисертаційного дослідження, проведений експеримент, який полягав у імітаційному моделюванні, що підтверджує обґрунтованість та коректність методу відображення навігаційної ситуації, відображені в технологічній карті.

Завершальний підрозділ другого розділу містить загальну методику проведення дисертаційного дослідження, яка відображає зміст його основних етапів та застосовуваних сучасних наукових методів дослідження.

РОЗДІЛ 3

РИЗИКИ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ І ЇХ ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ СУДНОВОДІННЯ

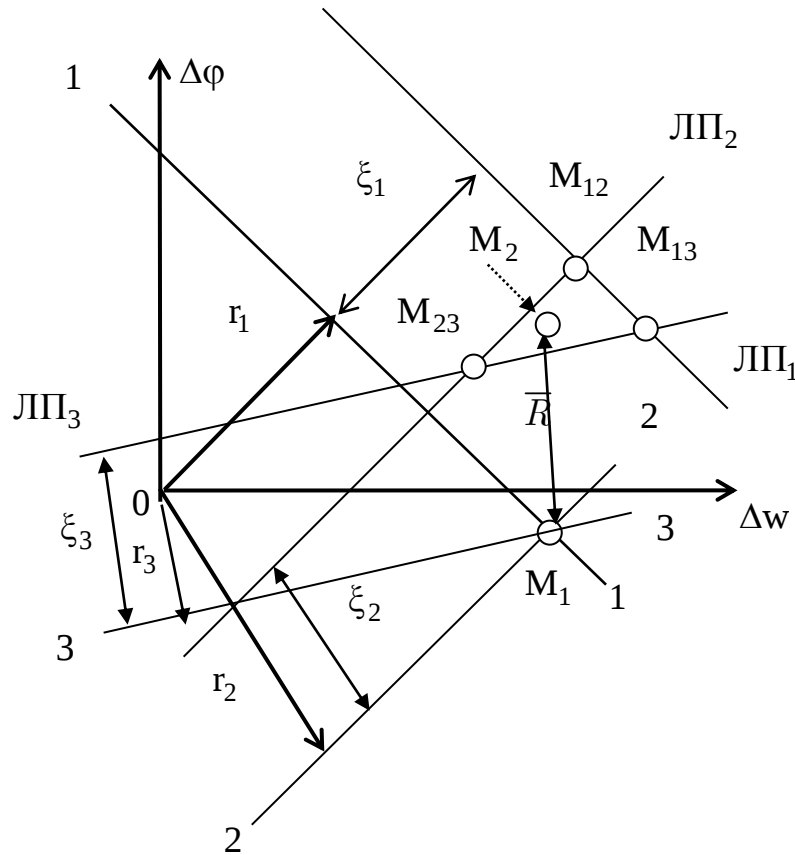
3.1. Ризики аварій, які виникають через похибки навігаційних вимірювань

Для забезпечення безаварійного плавання судна в стислих водах необхідно контролювати його позицію відносно програмної траєкторії руху, попереджуючи виникнення можливих навігаційних аварій, перш за все посадок на мілину, або зіткненнями з підводними перешкодами. Щоб встановити місцезнаходження судна, виконуються виміри навігаційних параметрів, що містять випадкові похибки. Відхилення ліній положення підпорядковуються тому самому закону розподілу ймовірностей, що й похибки навігаційних вимірів. Точність місця судна, визначена по одержаним лініям положення, характеризується векторіальною позиційною похибкою.

Як зазначено в джерелі [69], обсервація — це процедура отримання оцінки справжніх координат судна шляхом вимірювання параметрів опорних навігаційних пунктів штучного або природного походження, положення яких заздалегідь відомі. При застосуванні методу ліній положення місце, визначене внаслідок обсервації, встановлюють за допомогою апарату аналітичної геометрії як точку перетину двох і більше ліній положення.

Зрозуміло, що за двома лініями положення обсервовану точку місця судна можна визначити однозначно, однак ситуація погіршується, коли використовують більше ліній. На рис. 3.1 наведено приклад визначення місця судна трьома лініями положення, при якому одна лінія є надлишковою. Якщо похибок ξ_1 , ξ_2 і ξ_3 немає лінії 1-1, 2-2 і 3-3 сходяться в одній точці M_1 , яка відповідає істинному місцю судна. Натомість наявність похибок відповідних

ліній положення ξ_1 , ξ_2 і ξ_3 веде до того, що лінії положення ЛП₁, ЛП₂ і ЛП₃ перетинаються в різних точках M_{12} , M_{13} і M_{23} .



исунок 3.1 – Визначення положення судна по трьом ЛП

Обсервована точка місця положення судна обирається за критерієм точності, який спирається на симетричну кореляційну матрицю випадкових похибок $\mathbf{K} = K_{kj}^2$, елементи якої можна визначити так

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y k_{12} \\ \sigma_x \sigma_y k_{12} & \sigma_y^2 \end{pmatrix}; \quad (3.1)$$

де σ_x , σ_y – середні квадратичні відхилення похибок по відповідній координаті ΔX і ΔY ; k_{12} – коефіцієнт кореляції між похибками.

Коефіцієнт кореляції похибок вимірювань k_{12} в ідеальному випадку при відсутності похибок обертається в нуль. Але наявність трьох і більше ліній положень призводить до виникненню похибок і $k_{12} \neq 0$. В цьому випадку двовимірна похибка $\Delta X, \Delta Y$ обчислення довготи і широти судна є центрованою нормальною випадковою величиною, густина розподілу якої подається функцією Гаусу [69]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ - \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + 2 \frac{xy}{\sigma_x\sigma_y k_{12}} \right) \right\}. \quad (3.2)$$

На першому етапі приведемо систему похибок $\Delta X, \Delta Y$ до незалежної двовимірної системи $\Delta \tilde{X}, \Delta \tilde{Y}$. Для цього кореляційну матрицю похибок $\mathbf{K} = K_{kj}^2$ приведемо до діагонального виду:

$$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{G} \mathbf{K} \mathbf{G}^T. \quad (3.3)$$

Тут матриця $\tilde{\mathbf{K}}$ є кореляційною матрицею двовимірної незалежної системи похибок $\Delta \tilde{X}, \Delta \tilde{Y}$, і має наступний вигляд

$$\tilde{\mathbf{K}} = \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_x^2 & 0 \\ 0 & \tilde{\sigma}_y^2 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

де $\tilde{\sigma}_x, \tilde{\sigma}_y$ – середні квадратичні відхилення відповідно похибок $\Delta \tilde{X}$ і $\Delta \tilde{Y}$.

Елементи матриці перетворення $\mathbf{G}$ визначаються так

$$g_{11} = g_{22} = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}{\sqrt{4(\sigma_x \sigma_y k_{12})^2 + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2}} \right) \right\}^{1/2},$$

$$g_{11} = -g_{22} = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}{\sqrt{4(\sigma_x \sigma_y k_{12})^2 + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2}} \right) \right\}^{1/2}$$

При цьому незалежна двовимірна системи похибок $\Delta\tilde{X}, \Delta\tilde{Y}$ буде нормальною випадковою величиною, густина розподілу якої має вигляд

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\tilde{\sigma}_x\tilde{\sigma}_y} \exp \left\{ - \left(\frac{x^2}{\tilde{\sigma}_x^2} + \frac{y^2}{\tilde{\sigma}_y^2} \right) \right\}. \quad (3.5)$$

Визначення координат судна за надмірних вимірювань методом максимальної правдоподібності дає ефективні оцінки. При цьому другі центральні моменти (дисперсії) та змішані складові коваріаційна матриці набувають мінімуму, тому матриця векторних похибок, отримана цим методом, позначена $K(\Delta X, \Delta Y)_{\min}$. У джерелі [81] доведено, що при різній точності ліній положення коваріаційна матриця має вигляд:

$$\mathbf{K}_{\min} = \frac{1}{\Delta_r} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i & -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \end{array} \right\|, \quad (3.6)$$

де n – число ліній положення; α_i – напрямок градієнта i -ї лінії положення;

$$\Delta_r = \left[\left(\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right]; s_i = \int_R \frac{\left[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f(\xi_i) \right]^2}{f(\xi_i)} d\xi_i.$$

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

Очевидно, чим більше значення дисперсії модуля векторіальної похибки, тим більша вірогідність навігаційної аварії судна, якщо воно рухається поблизу навігаційної перешкоди.

У роботах [65, 98–100] показано, що ймовірність безпечного проходження судна стислим маршрутом насамперед залежить від точності визначення його місцезнаходження.

Відповідно до праць [70,85,93,101,102], аналіз статистичних матеріалів похибок навігаційних вимірювань свідчить про те, що часто похибки підкоряються законам розподілу ймовірностей, відмінним від нормального закону.

Наразі в судноводінні при наявності надлишкових ліній положення для розрахунку обсервованих координат судна застосовують метод найменших квадратів, виходячи з припущення, що похибки вимірювання навігаційних параметрів η_i і, отже, похибки ліній положення ξ_i мають нормальний розподіл. Як відомо з теорії навігації, похибка одного навігаційного параметра має такий самий закон розподілу, що й похибка іншого, якщо врахувати значення градієнта відповідного навігаційного параметра [69] .

Необхідно розглянути оцінку коваріаційної матриці $K(\Delta w, \Delta \varphi)$ в умовах, коли при надлишку ліній положення координати отримують методом найменших квадратів, а закон розподілу похибок ξ_i відрізняється від нормального.

У роботі [81] показано, що для оцінки реального місця судна виконуються виміри певної кількості навігаційних параметрів; обсервована

точка при цьому є оцінкою положення судна, отриманою за наявних ліній положення. Через обмежену кількість ЛП самі обсервовані координати Δw і $\Delta \varphi$ виявляються випадковими величинами.

Прирошення координат при визначенні обсервованої позиції за лініями положення можна розглядати як невідомі параметри в рівняннях кожної ЛП. Тому побудова коваріаційної матриці векторної похибки за лініями положення зводиться до задачі оцінювання точності параметрів, отриманих з вимірювань, що містять ці шукані величини разом із випадковими похибками.

Подамо формулу для оцінки ефективності отриманих координат судна в умовах, коли справжня щільність розподілу похибок ліній визначення положення задається змішаним розподілом першого роду, а розрахунок координат при наявності надлишкових ліній положення виконується методом найменших квадратів. Априорну модель похибок $\phi(\xi)$ приймаємо нормальною, натомість реальна щільність задається наступним аналітичним виразом [85]:

$$f(\xi) = \frac{A_m}{(\xi^2/2 + \lambda)^{m+1}}, \quad (m \leq 6), \quad (3.7)$$

де $A_m = \frac{2^m \lambda^{m+\frac{1}{2}} m!}{\sqrt{2\pi} \cdot 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2m-1)} = \frac{2^{2m} (m!)^2}{\sqrt{2\pi} (2m)!} \lambda^{m+1/2}$ – нормуючий множник;

m – істотний параметр, який приймає цілі значення;

λ – масштабний параметр.

У роботі [85] приведено вираз для ефективності ε :

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

Отже, показник ефективності оцінки спостережуваних координат, отриманих методом найменших квадратів при похибках, що підкоряються першому змішаному закону, виявляється меншим за одиницю; його значення за різних значень істотного параметра подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Ефективність змішаного розподілу першого типу

m	1	2	3	4	5	6
ε	0,5	0,8	0,893	0,934	0,955	0,968

З таблиці видно, що при зростанні відповідного параметра змішаний розподіл наближається до нормального, а коефіцієнт ефективності прямує до одиниці. Розглянемо тепер випадок, коли похибки ліній положення підкоряються другому змішаному закону, щільність якого задається таким аналітичним виразом [85]:

$$f(\xi) = \frac{A_m}{(\xi^2 / 2 + \lambda)^{m+3/2}}, \quad (m \leq 5) \quad (3.8)$$

$$\text{де } A_m = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2m+1) \lambda^{m+1}}{\sqrt{2} 2^{m+1} m!} = \frac{(2m+1)! \lambda^{m+1}}{\sqrt{2} 2^{2m+1} (m!)^2}.$$

Вираз для оцінки ефективності матиме такий вигляд:

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

У табл. 3.2 приведені значення показника ефективності при різних значеннях параметра для другого типу змішаного розподілу.

Таблиця 3.2 – Значення показника ефективності ϵ другого змішаного розподілу

m	1	2	3	4	5
ϵ	0,7	0,857	0,917	0,945	0,962

Розглянуті випадки демонструють, що застосування методу найменших квадратів та найменшої квадратичної форми при ненормальних розподілах призводить до збільшення коваріаційної матриці похибок вимірювання в e^{-1} разів порівняно з мінімально можливим. У обох випадках ефективність зростає зі збільшенням m , оскільки зростанням m щільність $f(x)$ асимптотично прямує до щільності нормального розподілу.

Також наведемо формулу для коефіцієнта ϵ , що характеризує спостережувані положення корабля при розподілі похибок ліній місцеположення за узагальненим законом Пуассона. Цей узагальнений розподіл задається параметром c , а його нормована щільність має вигляд:

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

а значення ефективності ϵ :

$$\epsilon = \frac{1}{cc^{\frac{5}{2}} \frac{\exp(-c)}{\sqrt{2\pi}} \mathfrak{Z}(c)} = \frac{\sqrt{2\pi} \exp(c)}{c^{\frac{7}{2}} \mathfrak{Z}(c)}.$$

Для значень істотного параметра c від 3 до 20 були розраховані значення ефективності ϵ , а результати розрахунку представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Залежність ефективності ϵ від істотного параметра c

c	2,3	3	5	10	15	20
ϵ	1,0	0,7	0,4	0,2	0,133	0,1

З табл. 3.3 випливає, що з ростом істотного параметра c ефективність зменшується.

Отже точність обсервованих координат судна визначається не лише похибками вимірювання навігаційних параметрами, але і методом розрахунку координат при наявності надлишкових ліній положення.

Таким чином точність обсервацій місця судна є суттєвим ризиком навігаційної аварійності, який позначимо $\mathcal{R}_1$.

3.2. Загроза зіткнення

Під час зближення судна з об'єктом необхідно встановити наявність ризику зіткнення: для цього вимірюють пеленг і відстань до цілі, а потім обчислюють відстань найкоротшого зближення. Порівнявши отримане значення дистанції найкоротшого зближення з допустимою межею, приймають рішення про необхідність виконання маневру розходження.

Висвітимо цю обставину більш розлого. Враховуючи наявність похибок при вимірюванні пеленгу і дистанції, а також інерційності рухомого судна та інших обставин, з кожним із рухомих суден пов'язується двомірна область S_{nd} , так звана область неприпустимих позицій, в якій недопустимо перебування будь-яких сторонніх об'єктів. В разі розгляду відносного переміщення суден таким об'єктом є тільки інше судно.

Область неприпустимих позицій S_{nd} формується таким чином, щоб її межа відповідала нульовій вірогідності зіткнення. Кожній точці всередині

цієї області відповідає певна, відмінна від нуля, вірогідність виникнення зіткнення; при цьому ймовірність зіткнення суден зростає зі скороченням найкоротшої дистанції між ними.

Ризик зіткнення $\mathfrak{R}_2$ з'являється за прогнозованого потрапляння кораблів у зону неприпустимих положень S_{nd} . Вона слугує превентивною оцінкою потенційно небезпечного розташування з урахуванням прогнозованих змін відносної орієнтації та положення об'єктів. Така оцінка носить умовний характер, оскільки її достовірність залежить від можливих маневрів суден та застосованих методик прогнозування. Ризик зіткнення $\mathfrak{R}_2$ вважається наявним, коли передбачене значення мінімальної дистанції зближення D_{min} менше допустимої дистанції D_d , розмір якої визначається параметрами забороненої області та ракурсу зближення суден.

Ризик зіткнення $\mathfrak{R}_2$ характеризується інтенсивністю, величина якої пропорційна вірогідності зіткнення суден. За допомогою деякого правила інтенсивність Ризик зіткнення $\mathfrak{R}_2$ можна ранжувати цілочисельними значеннями від 0 (відсутність ризику зіткнення $\mathfrak{R}_2$) до деякого максимального значення. У роботі [58] показано, що ризик зіткнення $\mathfrak{R}_2$ може приймати три значення:

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

В приведеному виразі t_{zij} є час запасу, розуміння якого полягає в наступному.

Якщо за наявності ризику $\mathfrak{R}_2$ відстань між суднами перевищує значення D_d і судно в змозі маневром забезпечити максимально можливе

значення мінімальної дистанції зближення $\max D_{\min}$, яке задовольняє вимогу безпеки $\max D_{\min} > D_d$, то його положення вважають допустимим. Зі зменшенням інтервалу між об'єктами настає момент часу t_{di} , коли досягається рівність $\max D_{\min} = D_d$. При подальшому зближенні суден з програмними параметрами руху $\max D_{\min} < D_d$, і судно потрапляє до підмножини неприпустимих позицій, причому ніяким маневром зміни курсу воно не зможе розійтися з іншим судном в дистанції D_d . Тому час запасу t_{zi} дорівнює інтервалу часу від поточного моменту до моменту часу t_{di} попадання судна до підмножини неприпустимих позицій. Значення загального часу запасу t_{zij} для пари суден доцільно вибрати зі співвідношення $t_{zij} = \min(t_{zi}, t_{zj})$.

Нині запропоновано понад десять форм безпечної області цілі D_b [103]. Розглянемо п'ять форм безпечної області, що найчастіше використовуються, які показані на рисунку 3.1, та позначимо їх наступним чином:

- 1 – $D_b^{(Rd)}$ – форма кола з ціллю у центрі;
- 2 – $D_b^{(El)}$ – форма еліпса зі зміщеною ціллю;
- 3 – $D_b^{(Rt)}$ – форма прямокутника зі зміщеною ціллю;
- 4 – $D_b^{(Cm)}$ – складна форма зі зміщеною ціллю;
- 5 – $D_b^{(RE)}$ – форма півкола – напівеліпс зі зміщеною ціллю.

Причому перші три типи безпечної цілі D_b є простими, а два останніх – складними.

Перша область $D_b^{(Rd)}$ має форму кола з єдиною характеристикою – радіусом R_b . Друга область $D_b^{(El)}$, що має еліптичну форму, характеризується трьома параметрами: півсями a_b та b_b , а також зміщенням ΔX_b обсервованої точки цілі щодо центру області D_b .

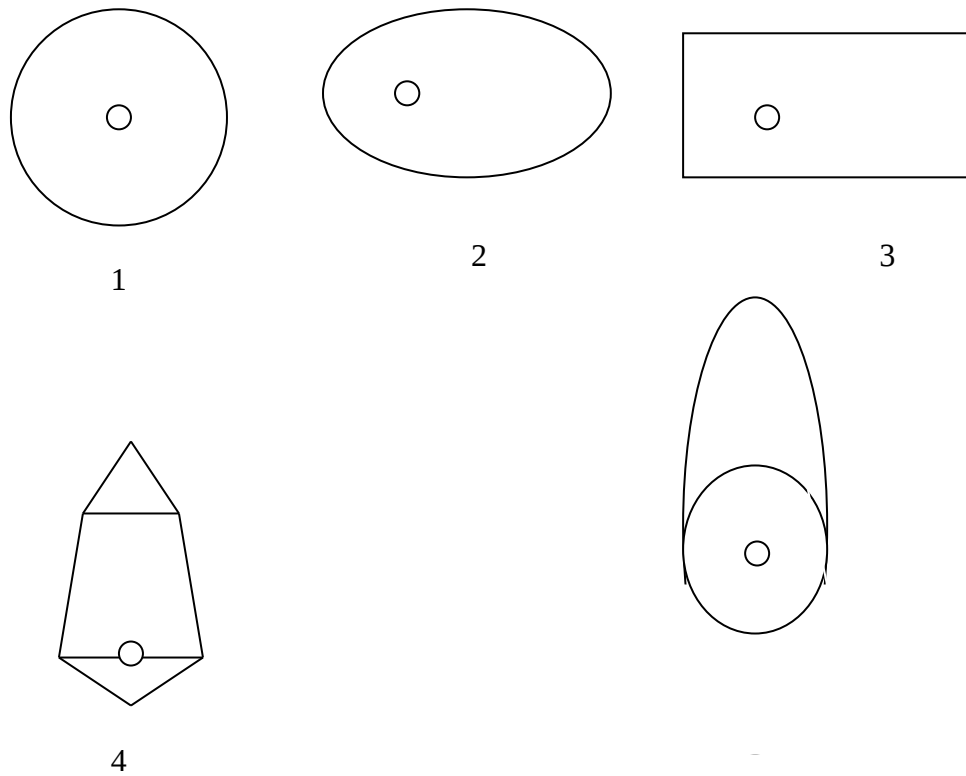


Рисунок 3.1 – Основні форми безпечної області цілі D_b

Третя область $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми визначається також трьома параметрами: довжина області від обірваної точки мети в носовому напрямку L_{bn} , у кормовому напрямку – L_{bk} і ширина області B_b . Четверта область $D_b^{(Cm)}$ складної форми має чотири параметри: носова L_{bn} та кормова L_{bk} частини довжини області, а також менша b_1 та більша b_2 ширина області (рисунок 3.2).

І, нарешті, п'ята область $D_b^{(RE)}$, що має форму півкола напів-еліпса, характеризується двома параметрами: радіусом кола R_b та більшою піввіссю еліпса a_b (рисунок 3.3).

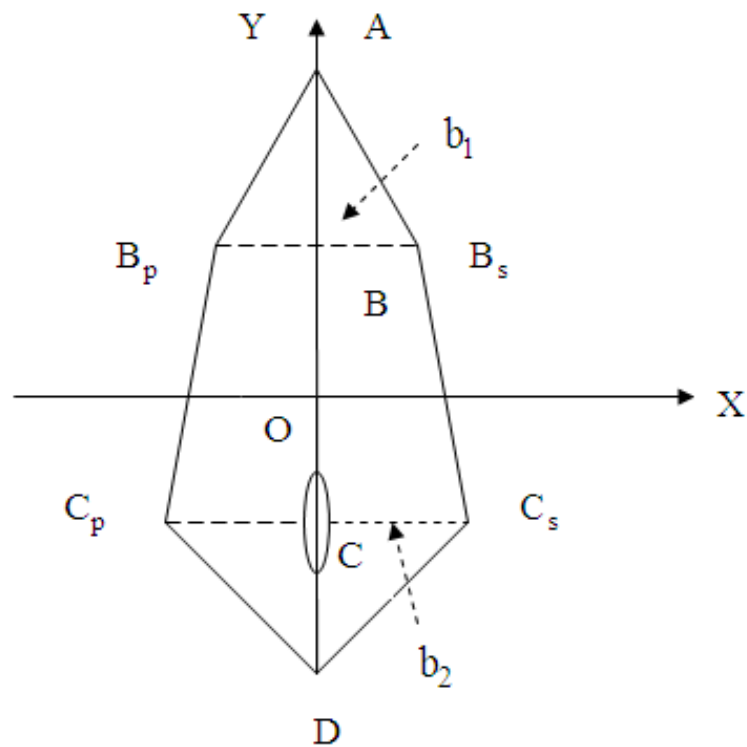


Рисунок 3.2 – Безпечна область $D_b^{(Cm)}$ цілі мети складної форми

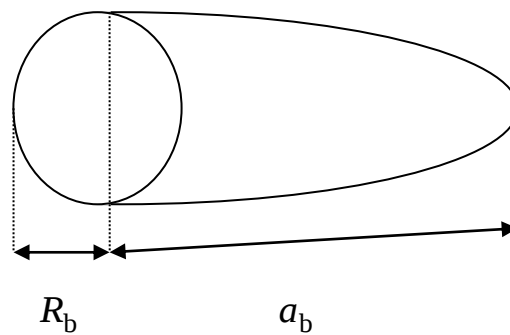


Рисунок 3.3 – Безпечна область $D_b^{(RE)}$ цілі п'ятого типу

3.3. Вплив маневрування судна на навігаційну безпеку

При маневруванні суден, сили інерції, що виникають, в залежності від конструкції гірокомпаса впливають безпосередньо або опосередковано на

його чутливий елемент, викликаючи сумарну інерційну похибку. За винятком декількох моделей (наприклад, «Standard -20»), у гірокомпасах, побудованих на класичних гіроскопах (з роторами, що швидко обертаються), у вихідній інформації про курс судна міститься сумарна інерційна похибка. При управлінні судном наявність такої похибки у показаннях гірокомпасу викликає лінійне зміщення судна щодо прямолінійної програмної траєкторії руху.

Розглянемо питання оцінки максимальних значень поперечного лінійного зміщення судна, що виникає від появи сумарної інерційної похибки гірокомпаса в результаті маневрування судна, та доцільності включення її до ризиків навігаційної аварійності.

Маневрування судна в типовому гірокомпасі викликає виникнення сумарної інерційної похибки, позначеної як δ_j^Σ . Математичний опис цієї похибки як функції часу з урахуванням специфіки виконуваного маневру представлений системою з чотирьох або п'яти диференціальних рівнянь (залежно від конструкції приладу); розв'язки такої системи мають вигляд затухаючих коливань.

Якщо на судні напрям площини істинного меридіана моделюється направленням головної осі чутливого елемента, похибки гірокомпасу призводять до бічного лінійного зміщення судна d відносно заданої траєкторії. Відповідно до наведеного твердження, величина цього зміщення d пропорційна сумарній інерційній похибці гірокомпасу δ_j^Σ та швидкості судна V .

Бокове зміщення судна d визначається величиною компоненти швидкості, що є ортогональною до заданої траєкторії; за наявності сумарної інерційної похибки δ_j^Σ воно має аналітичний запис у вигляді наступного виразу:

$$V_{\perp} = V \sin \delta_j^{\Sigma},$$

а поточне значення бічного усунення d визначається виразом:

$$d = \int_0^t V \sin \delta_j^{\Sigma} d\tau.$$

При постійній швидкості судна V зміщення d виражається так:

$$d = V \int_0^t \sin \delta_j^{\Sigma} d\tau.$$

Навіть у високих широтах пікові значення сумарної інерційної похибки підкоряються співвідношенню $\delta_j^{\Sigma} \leq 7^{\circ}$, тому замість величини $\sin \delta_j^{\Sigma}$ доцільно використовувати значення сумарної інерційної похибки δ_j^{Σ} , подане в радіанній мірі. У результаті формула для оцінки d набуває спрощеного вигляду:

$$d = V \int_0^t \delta_j^{\Sigma} d\tau. \quad (3.9)$$

Інерційна похибка гірокомпасу з автономним управлінням чутливого елемента виникає при маневруванні судна (зміна швидкості або курсу) через те, що меридіональна складова сил інерції F_{jN} , що виникає в процесі маневрування, впливає на чутливий елемент.

По-перше, сила інерції F_{jN} прикладається до зниженого центру тяжіння, створюючи момент L_{jy} щодо осі У-У. По-друге, сила інерції F_{jN} впливає на частинки олії в рідинному заспокоювачі, переганяючи їх із однієї

посудини в другу. В результаті цього в одному з судин рідинного заспокійника виникає небажаний надлишок олії, вага якого створює другий горизонтальний момент L_{my} .

Незалежно від характеру маневру судна моменти L_{jy} та L_{my} завжди протилежно спрямовані, причому, зазвичай, $L_{jy} > L_{my}$. Момент сил інерції L_{jy} викликає прецесійний рух головної осі чутливого елемента в азимуті щодо вертикальної осі $Z-Z$, яка починає виходити з площини гіроскопічного меридіану.

Для прогнозування величини усунення d використовують спрощену модель формування сумарної інерційної похибки δ_j^Σ , що припускає миттєвий поворот судна. Таке перше наближення є допустимим у зв'язку з великим періодом власних коливань стандартних гірокомпасів [104]. У межах цієї моделі для опису сумарної похибки δ_{j1}^Σ гірокомпасів з твердим маятником достатньо системи трьох диференціальних рівнянь. Розв'язання цієї системи дає спрощену залежність δ_{j1}^Σ , починаючи з моменту завершення:

$$\delta_{j1}^\Sigma = \Delta V_N [Ae^{-mt} + Ce^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi)], \quad (3.10)$$

де ΔV_N – зростання північної складової швидкості судна, спричинене маневром A , C і ψ – відповідні константи інтегрування і початкова фаза, які однозначно фіксуються початковими умовами; ω_d – частота загасаючих коливань чутливого елемента; m і h – відповідно аперіодичний член та коефіцієнт загасання.

Значення величин A , C , ψ , ω_d , m і h залежать від параметрів чутливого елемента (кінетичного моменту, модуля твердого маятника, модуля масляного заспокійника, факторе перетікання рідини) і широти плавання

судна φ , тобто. є відомими величинами, а значення ΔV_N розраховується за допомогою формули:

$$\Delta V_N = V_2 \cos K_2 - V_1 \cos K_1,$$

де V_1 , K_1 і V_2 , K_2 – параметри руху судна відповідно до маневру і після маневру.

На рисунку 3.4 для широти 10° показана крива сумарної інерційної девіації функції часу.

Графік сумарної інерційної девіації для широти 80° представлений на рисунку 3.5.

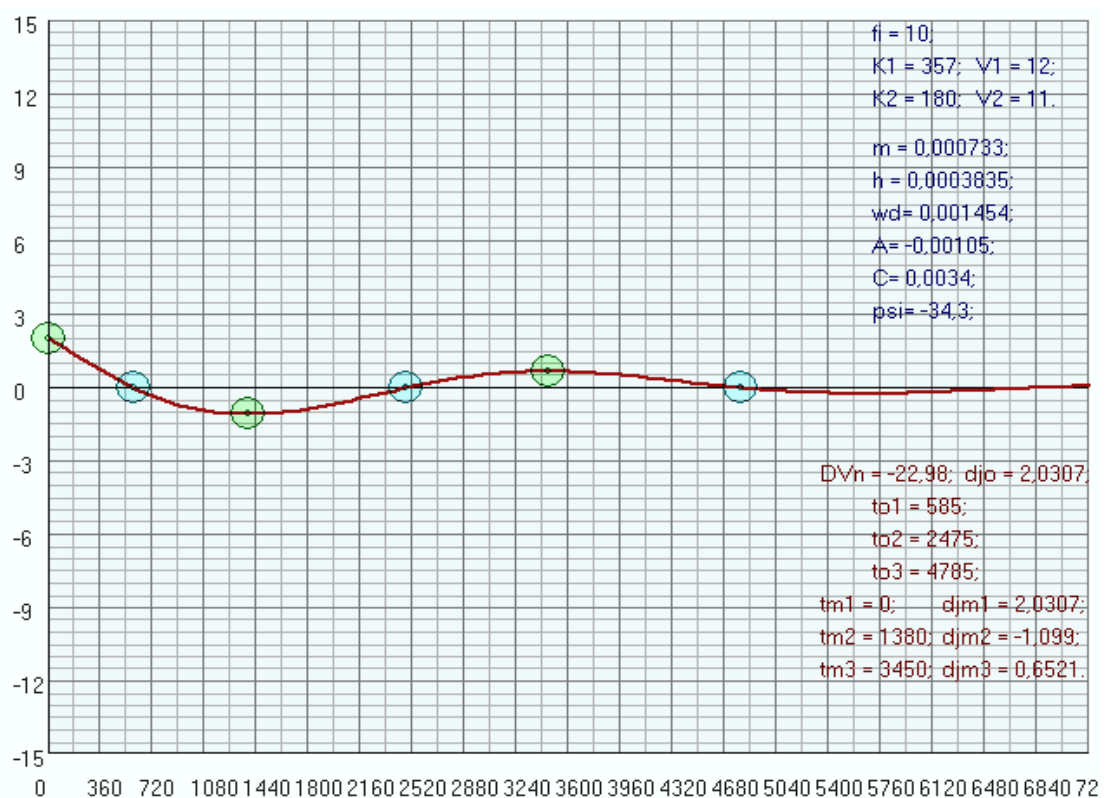


Рисунок 3.4 – Графік δ_{j1}^{Σ} гірокомпасу з твердим маятником для широти 10°

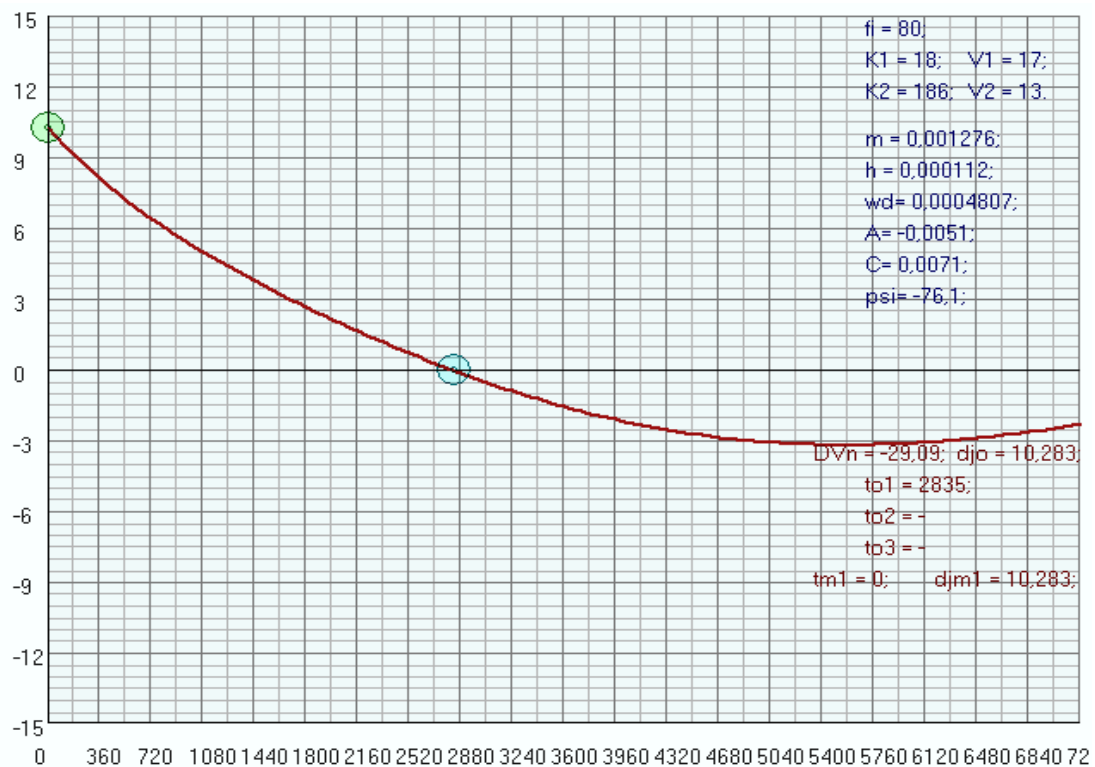


Рисунок 3.5 – Графік δ_{j1}^{Σ} гірокомпасу з твердим маятником для широти 10°

Механізм появи інерційної похибки коректованого компаса з непрямим управлінням описується так. Так як в даному типі гірокомпасу як чутливий елемент використовується астатичний триступеневий гіроскоп, то сила інерції F_{jN} не безпосередньо впливає на чутливий елемент. Однак вона зміщує щодо нейтрального положення робоче тіло індикатора горизонту, викликаючи на його виході хибний сигнал.

Згадані помилковий сигнал після посилення надходить на датчики горизонтального та вертикальних моментів, викликаючи появу паразитних моментів, під дією яких чутливий елемент здійснює прецесійний рух, йдучи з площини меридіана. Так як в даному типі гірокомпасу при маневрі не змінюється положення динамічної рівноваги головної осі чутливого елемента, то відхід головної осі чутливого елемента з площини меридіана під дією паразитних моментів і є його інерційною похибкою.

Для коригованого гірокомпаса з непрямим управлінням спрощена модель формування сумарної інерційної похибки містить систему двох диференціальних рівнянь, а вираз сумарної інерційної похибки δ_{j2}^{Σ} даного типу гірокомпаса має такий аналітичний вигляд:

$$\delta_{j2}^{\Sigma} = -V\omega[Ne^{-mt} + Me^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi)], \quad (3.11)$$

де ω – кутова швидкість повороту судна.

Підставляючи у вираз (3.9) формулу (3.10) після інтегрування отримаємо аналітичну залежність поперечного лінійного зміщення для гірокомпаса з твердим маятником d_1 :

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

На рисунку 3.6 показано залежність поперечного лінійного усунення d_1 від поточного значення сумарної інерційної похибки для широти 10° . Як впливає з рисунка, в момент закінчення маневру сумарна інерційна похибка δ_{j1}^{Σ} є позитивною, що викликає зміщення судна з програмної траєкторії руху вправо. Поки знак δ_{j1}^{Σ} не змінюється, судно продовжує зміщуватися праворуч, і лінійне зміщення збільшується.

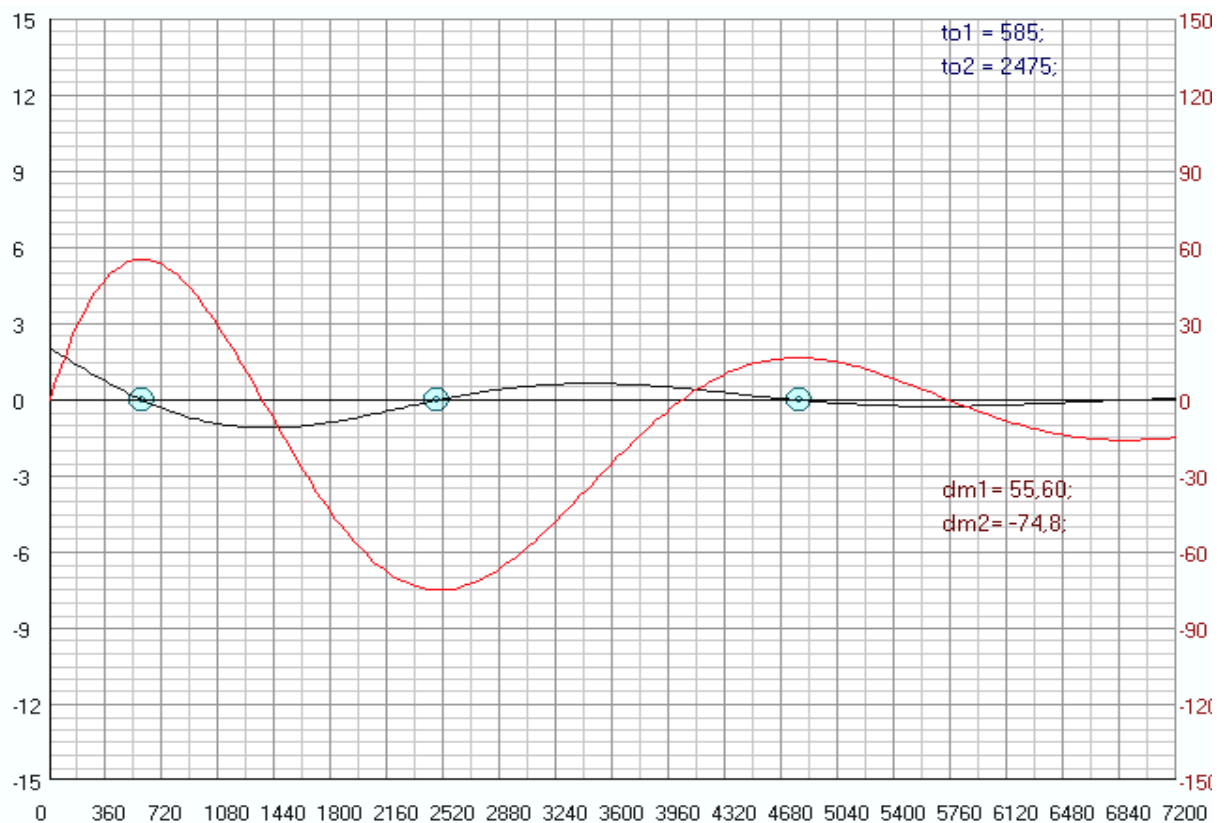


Рисунок 3.6 – Залежність поперечного зносу d_1 від сумарної інерційної похибки δ_{j1}^{Σ} для широти 10°

У момент часу, коли значення похибки δ_{j1}^{Σ} перетворюється на нуль, діаметральна площина судна паралельна програмної траєкторії руху, а величина зміщення d_1 досягає максимального позитивного значення. У наступний момент часу похибка δ_{j1}^{Σ} змінює знак і судно починає зміщуватися в інший бік – до програмної траєкторії руху, при цьому величина усунення d_1 , залишаючись позитивною, зменшується.

Через деякий час судно виходить на програмну траєкторію руху і зміщення перетворюється на нуль. Але оскільки сумарна інерційна похибка δ_{j1}^{Σ} має негативне значення, судно починає зміщуватися ліворуч від програмної траєкторії руху, тобто усунення стає негативним. Максимальне

негативне усунення досягається у момент часу, коли похибка δ_{j1}^{Σ} вдруге перетворюється на нуль. Надалі амплітудні значення зміщення зменшуються d_1 , і судно виходить на програмну траєкторію руху.

На рисунку 3.7 представлена залежність поперечного лінійного усунення d_1 від поточного значення сумарної інерційної похибки δ_{j1}^{Σ} для широти 80° .

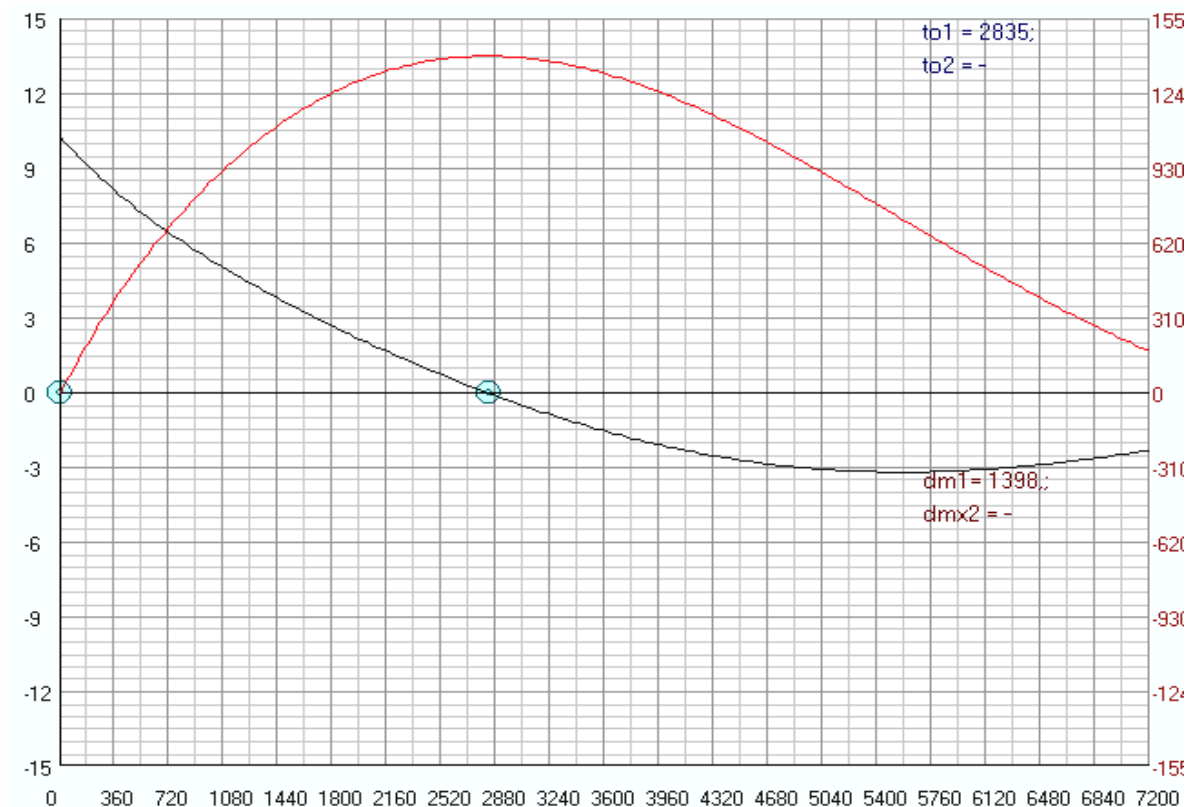


Рисунок 3.7 – Залежність поперечного зносу d_1 від сумарної інерційної похибки δ_{j1}^{Σ} для широти 80°

Враховуючи, що параметри чутливого елемента є індивідуальними для кожного з екземплярів, а для кожного екземпляра з плином часу вони ще змінюються в деяких межах, то побудувати точний графік зміни d_1 в часі неможливо, проте можна розрахувати значення першого і другого

максимального зсувів і складаючи їх абсолютні значення отримати ширину смуги можливого зміщення судна, в якій може знаходити приблизно дві години.

Аналогічним є механізм виникнення лінійного зміщення d_2 при управлінні судном за допомогою компаса з непрямым управлінням, що коригується.

Так, при підстановці формули (3.11) у вираз (3.9) отримаємо лінійне зміщення d_2 для коригованого гірокомпаса з непрямым керуванням:

$$d_2 = V^2 \omega \left\{ \frac{N}{m} (1 - e^{-mt}) + \frac{M}{\omega_d^2 + h^2} [e^{-ht} (h \sin(\omega_d t + \psi) + \omega_d \cos(\omega_d t + \psi)) - \rightarrow h \sin \psi - \omega_d \cos \psi] \right\}.$$

Оцінка максимуму лінійного зміщення $d_{\max(1,2)}$ передбачає знаходження критичних моментів часу $t_{\max(1,2)}$ (можливо більше одного) із рівняння (3.9) або (3.10) залежно від типу гірокомпаса, перевірку їх як максимумів (через другу похідну або порівняння значень), а також відбір глобального максимуму на заданому інтервалі часу:

$$\delta_{j(1,2)}^{\Sigma}(t_{\max(1,2)}) = 0.$$

Для рівняння (3.10) як початкове отримаємо рівність:

$$\sin(\omega_d t_{\max 1} + \psi) = -\frac{A}{C} e^{(h-m)t_{\max 1}},$$

яке потрібно привести до форми, зручної для розв'язання методом простих ітерацій:

$$t_{\max 1} = \frac{1}{\omega_d} \left\{ \arcsin \left[-\frac{A}{C} e^{(h-m)t_{\max 1}} \right] - \psi \right\}.$$

Після обчислення відповідної величини $t_{\max 1}$ її підставляють у формулу для d_1 — отримане значення і є шуканим максимальним лінійним поперечним зміщенням. Моменти часу, коли досягається максимальне лінійне усунення d_2 , визначаються аналогічно. Як повідомляється в [104], на широті 70° при $\Delta V_N = 30$ вузлів ширина смуги лінійного зміщення може сягати понад 4 кбт.

Наявність сумарної інерційної похибки в значенні пеленгу після маневру судна викликає появу позиційної похибки між obserвованим та істинним положенням судна. Наприклад, при obserвації по пеленгам двох орієнтирів 1 і 2 (рисунок 3.8) істинне М1 та obserвоване М2 місця судна не співпадають.

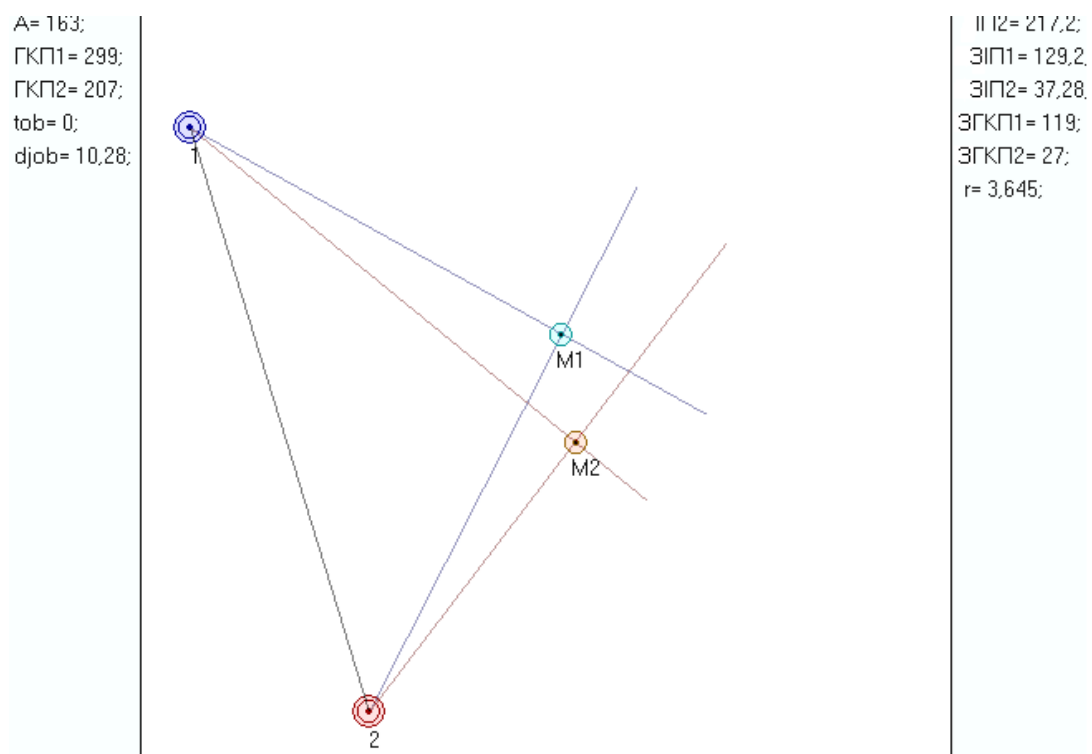


Рисунок 3.8 – Позиційна похибка в широті 80°

Приклад наведено для широти 80° , сумарна інерційна похибка після повороту судна на 160° має значення $10,3^\circ$, а позиційна похибка досягає 3,6 милі.

На рисунку 3.9 показана позиційна похибка в широті 10° , величина якої 0,7 милі при значенні сумарної інерційної похибки 2° .

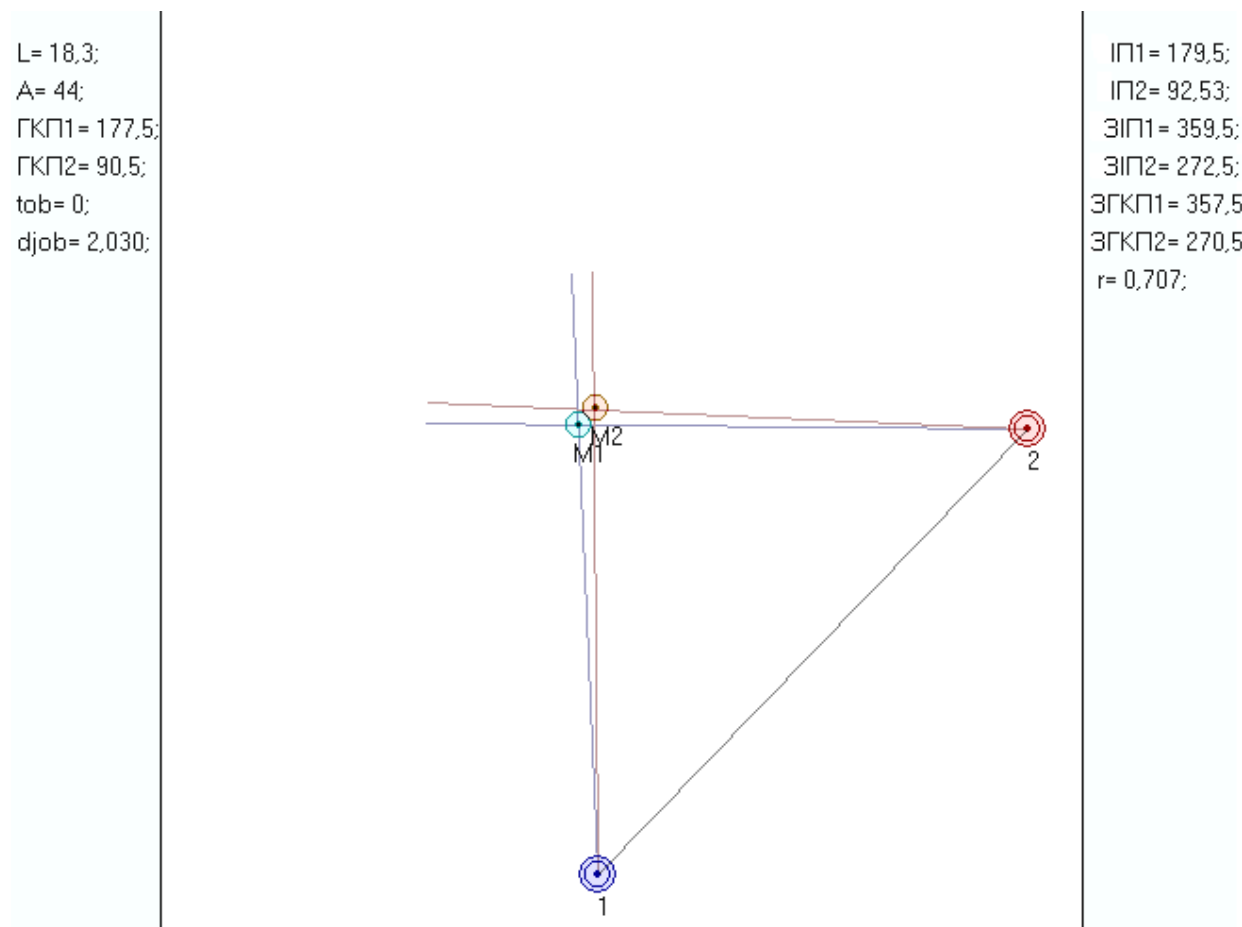


Рисунок 3.9 – Позиційна похибка в широті 10°

Таким чином, маневрування судна породжує ризик навігаційних аварій $\mathfrak{R}_3$ через появу бокового лінійного зміщення і позиційної похибки при використанні пеленга для обсервації.

3.4. Систематична векторіальній похибка повороту судна

Під час повороту судна векторна похибка відносно прогнозованої позиції на новому курсі може виникнути з такої причини.

Момент початку повороту t_n обирають так, щоб після маневру судно опинилося в прогнозованій позиції, виходячи з динамічної моделі його обертального руху. Прогнозована траєкторія, отримана за цією моделлю, відрізняється від реальної траєкторії руху, внаслідок чого з'являється похибка Δt_n у визначенні моменту початку повороту t_n і виникає систематична складова векторної похибки управління судном $S^{(d)}$.

Звернемося до рисунку 3.10 для виявлення механізму появи систематичної векторіальній похибки $S^{(d)}$.

З обраної моделі обертального руху розраховують час початку повороту t_n , якому на програмній траєкторії відповідає точка С; пунктиром показано прогноз переходу. Для досягнення реальної траєкторії маневр слід ініціювати в момент $\tilde{t}_n$, відповідний точці В.

Якщо поворот розпочати в розрахований момент t_n , судно вийде в точку N, що не збігається з точкою М. Систематична векторіальна похибка $S^{(d)}$ дорівнює відстані між точками М і N, тобто відрізку. Із рисунка видно, що відрізки MN і ВС рівні і систематична векторіальна похибка $S^{(d)}$ дорівнює відрізку ВС, тобто $S^{(d)} = BC$.

Як видно з рисунку 3.10, величина відрізка ВС залежить від швидкості судна V_o і інтервалу часу $t_n - \tilde{t}_n$. Тому систематична векторіальна похибка $S^{(d)}$ визначається виразом:

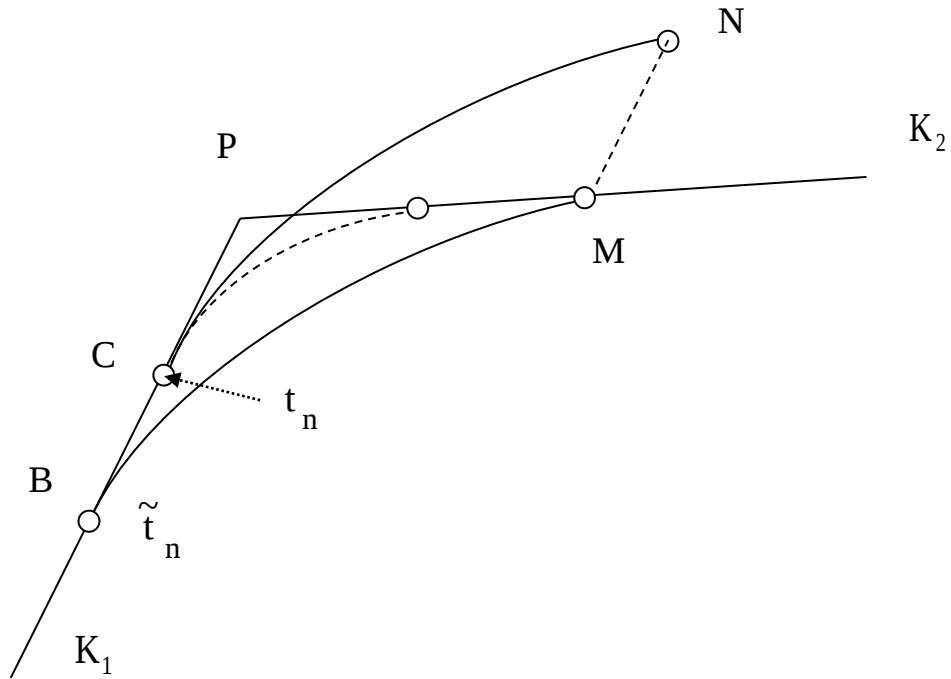


Рисунок 3.10 – Виникнення систематичної векторіальної похибки $S^{(d)}$

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

з проекціями $S_x^{(d)}$ та $S_y^{(d)}$:

$$S_x^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \sin K_1,$$

$$S_y^{(d)} = V_o \text{Abs}(t_n - \tilde{t}_n) \cos K_1.$$

Момент часу t_n розраховується, як правило, за моделлю обертового руху судна із незмінною кутовою швидкістю, а момент часу $\tilde{t}_n$, забезпечує вихід на задану лінію курсу при реальному русі судна.

Як видно на рисунку 3.11, маневр повороту складається з двох фаз. В першій фазі, у початковий момент t_n , судно має курс K_1 , проводять перекладку пера керма на заданий кут β_k і фіксують кермо в цьому положенні протягом часу Δt_k .

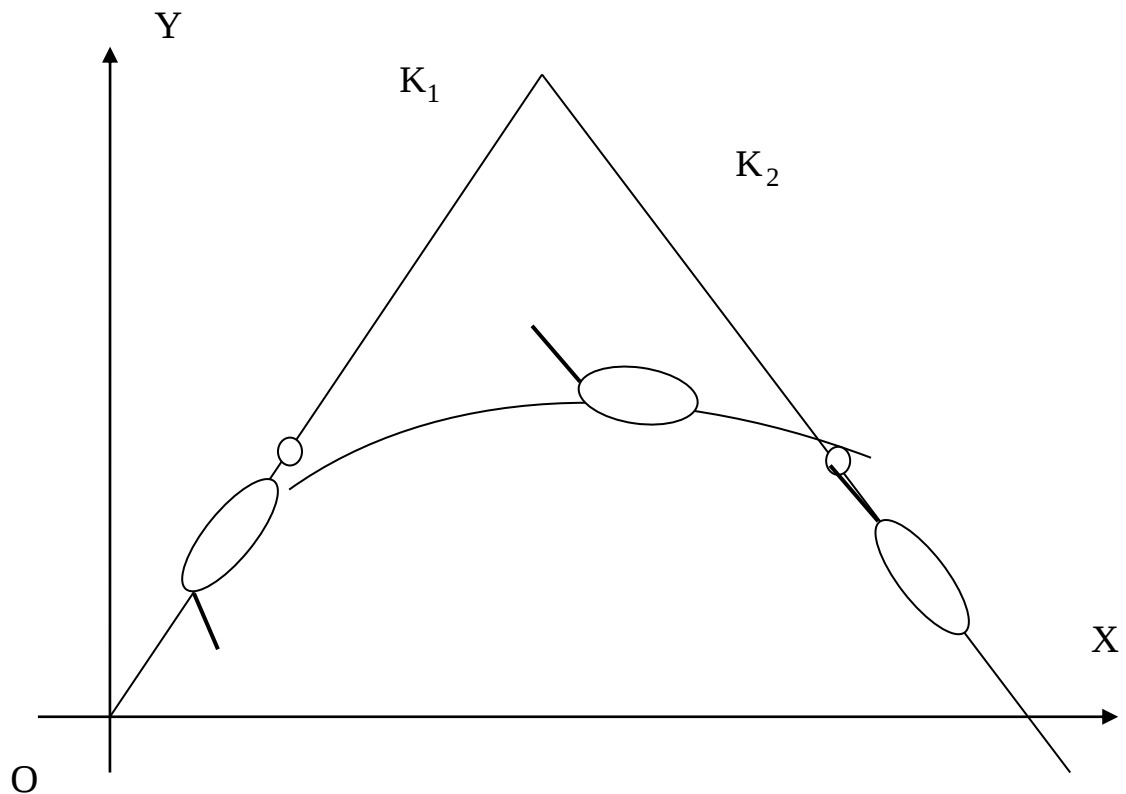


Рисунок 3.11 – Поворот судна

На другій фазі повороту судно «одержують»: перо керма переводять на протилежний борт на ту саму величину та гасіння інерції повороту триває протягом інтервалу часу Δt . По завершенні цієї фази судно виходить на заданий курс K_2 , кутова швидкість дорівнює нулю, а перо керма повертається в діаметральну площину судна.

Наведемо формулу для обчислення моменту початку t_n повороту судна з курсу K_1 на курс K_2 програмної траєкторії руху (рис. 3.12). На рисунку початок системи координат OXY збігається з початковим положенням судна.

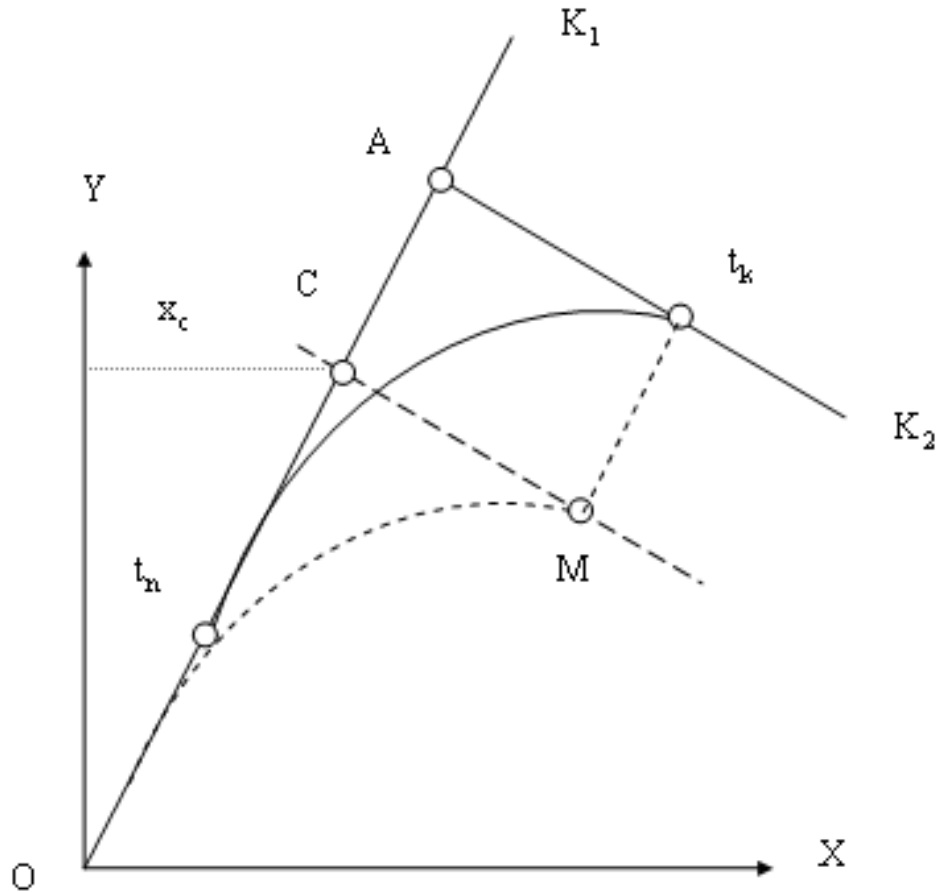


Рисунок 3.12 – Криволінійна траєкторія руху судна при повороті

Будемо вважати, що маневр стартує в момент $t = 0$ і завершується в точці M виходом на заданий курс K_2 . Рух по кривій OM у напрямі початкового курсу K_1 до збігу точки M з другою частиною програмної траєкторії курсом K_2 , що проходить через точку A , визначає положення початку повороту у відповідний момент часу t_n .

Далі наведено формалізований опис запропонованого підходу. Рівняння прямолінійної ділянки траєкторії при курсі K_1 записується так:

$$y = x \cdot \operatorname{ctg} K_1.$$

Рівняння прямої лінії, що проходить через точку M курсом K_2 , виражається наступним чином:

$$y = y_m + (x - x_m) \operatorname{ctg} K_2.$$

Координати точки $C (x_c, y_c)$ визначаємо, так як вона є точкою перетину згаданих двох прямих ліній, тобто з системи рівнянь:

$$\begin{cases} y_c = x_c \operatorname{ctg} K_1; \\ y_c = y_m + (x_c - x_m) \operatorname{ctg} K_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

Звідки:

$$x_c \operatorname{ctg} K_1 = y_m + (x_c - x_m) \operatorname{ctg} K_2.$$

З останнього виразу знаходимо x_c :

$$x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}.$$

З урахуванням першого виразу системи рівнянь (3.12) отримаємо вираз для ОС:

$$OC = \sqrt{x_c^2 + x_c^2 \operatorname{ctg}^2 K_1} = \frac{x_c}{\sin K_1}.$$

Очевидно, що час початку повороту судна визначається виразом:

$$t_n = \frac{OA - OC}{V_1} = \frac{D - \frac{x_c}{\sin K_1}}{V_1} = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1}.$$

Розрахунок значення x_c потребує визначення приросту координат судна x_m та y_m за час маневру τ :

$$x_m = \int_0^{\tau} V_1 \sin[K_1 + K(t)] dt, \quad y_m = \int_0^{\tau} V_1 \cos[K_1 + K(t)] dt. \quad (3.13)$$

Як уже зазначалося, маневр судна поділяється на дві фази. На першій фазі впродовж інтервалу часу Δt_1 здійснюється поворот внаслідок відхилення стерна на кут β_k . На другій фазі стерно переводять на протилежний борт на ту саму величину; протягом інтервалу часу Δt_2 інерція обертання погашається і судно виходить на заданий курс K_2 .

Отже, вираз (3.13) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} x_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \sin[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \\ y_m &= \int_0^{\Delta t_1} V_1 \cos[K_1 + K] dt + \int_0^{\Delta t_2} V_1 \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}] dt, \end{aligned} \quad (3.14)$$

де K і $\tilde{K}$ – поточне значення курсу судна відповідно на першій та другій фазах повороту.

Обчислення інтервалів часу Δt_1 і Δt_2 в загальному вигляді проводиться з допомогою наступної системи рівнянь [105]:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_1) + \tilde{K}(\Delta t_2) \\ \omega(\Delta t_1, \Delta t_2) = 0 \end{cases}, \quad (3.15)$$

в якій перше рівняння є очевидним співвідношенням, а друге – відповідає умові зменшення до нуля кутової швидкості ω судна в кінці повороту.

Підставляючи вирази $K(\Delta t_1)$, $\tilde{K}(\Delta t_2)$ і $\omega(\Delta t_1, \Delta t_2)$ у вираз (3.15), одержимо залежності, з яких можна розрахувати значення Δt_1 і Δt_2 методом простих ітерацій. Після чого, скориставшись отриманими значеннями Δt_1 і Δt_2 , шукані прирости координат судна x_m та y_m розраховуються з допомогою виразу:

$$x_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_1(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_2(t) dt \right]; y_m = V_1 \left[\int_0^{\Delta t_1} y_3(t) dt + \int_0^{\Delta t_2} y_4(t) dt \right], \quad (3.16)$$

де $y_1(t) = \sin[K_1 + K(t)]; y_2(t) = \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)];$

$y_3(t) = \cos[K_1 + K(t)]; y_4(t) = \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)].$

Для чисельного обчислення кожного з чотирьох інтегралів у формулі (3.16) доцільно використовувати метод Сімпсона. У загальному випадку шуканий інтеграл можна записати:

$$\mathfrak{I}_i = \int_0^{\Delta t_i} y_i(t) dt.$$

Відмітимо, що інтервал часу Δt_i , на якому проводиться інтегрування, потрібно розбити на парне число n елементарних інтервалів h_j , тривалістю кожного з яких рівній $h=1$ с. У способі Сімпсона підінтегральна функція $y_i(t)$ на кожному інтервалі $2h_j$ апроксимується інтерполяційним многочленом Лагранжа другого ступеня, причому справедливо співвідношення:

$$\int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} y_i(t) dt \approx \frac{h}{3} [y_i(t_{j-1}) + 4y_i(t_j) + y_i(t_{j+1})].$$

Якщо позначити $y_{ij} = y_i(t_j)$, то шуканий визначений інтеграл обчислюється за такою формулою:

$$\mathfrak{I}_i = \int_0^{\Delta t_i} y_i(t) dt = \frac{h}{3} [y_{i0} + 4(y_{i1} + y_{i3} + \dots + y_{i(n-1)}) + 2(y_{i2} + y_{i4} + \dots + y_{i(n-2)}) + y_{in}].$$

Час завершення маневру судна t_k визначається за допомогою такого виразу:

$$t_k = t_n + \Delta t_1 + \Delta t_2.$$

У джерелі [105] виконано імітаційне моделювання маневру контейнеровоза «Oxford» з оцінкою траєкторної похибки на момент завершення повороту. Як еталон обрали найточнішу модель руху, яка описує зміну курсу рівнянням третього порядку з урахуванням часу перекладки керма. За результатами симуляції повороту на 90° виявлено, що при прогнозі

криволінійного відрізка за моделлю зі сталою кутовою швидкістю похибка траєкторії становить 150–200 м.

Таке значення систематичної векторіальної похибки при плаванні в стислих водах є суттєвим, і ризик навігаційних аварій $\mathfrak{R}_4$, який виникає в зв'язку з поворотом судна слід враховувати.

3.5. Висновки до третього розділу

В розділі розглянуто ризики навігаційних аварій і їх вплив на безпеку судноводіння, а також доцільність їх врахування.

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

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

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

При повороті судна виникає систематична векторіальна похибка відносно прогнозованої позиції виходу судна на новий курс, причиною якої є різниця між реальною траєкторією і прогнозованою, що визначається за моделлю обертального руху судна. Показано, що значення систематичної векторіальної похибки при плаванні в стислих водах є суттєвим, і ризик навігаційної аварійності, який виникає в зв'язку з поворотом судна, необхідно враховувати.

РОЗДІЛ 4

МІРИ ПО ЗНИЖЕННЮ НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ВПЛИВУ СУТТЄВИХ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ

4.1. Урахування похибок навігаційних вимірювань

Розглянемо можливість зниження впливу ризику навігаційної аварійності $\mathcal{R}_1$, який виникає від похибок навігаційних вимірювань, на безпеку судноводіння.

Завдяки розвитку інформаційних та комп'ютерних технологій формування навігаційної обстановки все більше перейшло на апаратні засоби. Впровадження ЕКНІС, супутникової навігації, АІС і ЗАРП дозволило комплексно формувати й відтворювати навігаційну картину, причому центральним елементом стала електронна карта з нанесеними поточною позицією судна та даними про положення й параметри руху навколишніх об'єктів від ЗАРП і АІС. Така візуалізація значно полегшує судноводієві прийняття рішень для безаварійного управління судном.

Проте таке відображення навігаційної обстановки не дає повної інформації. Для безпеки судноводіння важливими є параметри точності позиціонування за навігаційними орієнтирами, що стає особливо критичним у зонах зі слабким або нестабільним прийомом супутникових сигналів.

Тому систему відображення навігаційної ситуації доцільно розширити візуалізацією рівня точності обсервацій у зоні плавання судна. Це дасть змогу оперативно виконувати коректуру програмної траєкторії для кращого контролю положення та вибору умов, які зменшують позиційні похибки. Для кожної елементарної площини — зіставної з розмірами судна — слід розрахувати векторні похибки відносно її центра, підбираючи різні комбінації

орієнтирів і відображаючи оцінку точності координат разом з тим набором орієнтирів, при якому вона досягається.

Візуалізацію поля точностей у районі руху можна здійснити через кольорову шкалу значень критерію точності та накладання цього шару з прозорістю на електронну карту. У результаті модель навігаційної обстановки поповнюється наочною інформацією про якість контролю положення судна.

Таким чином, для формування поля точностей обсервації судна необхідно вибрати чисельний (скалярний) показник, що характеризує величину векторіальної похибки в довільній позиції поля.

Кожен із орієнтирів забезпечує можливість отримання двох ліній положення (пеленг та дистанція). Так як кожна пара містить різнорідні лінії положення, то їх похибки ξ_1 і ξ_2 є незалежними та різноточними. У цьому випадку вирази для дисперсій D_x і D_y коваріаційної матриці мають такий вигляд [106]:

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

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

де

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

$$s_{Di} = \int_{R_i} \frac{\left[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Di}(\xi_i) \right]^2}{f_{Di}(\xi_i)} d\xi_i, \quad s_{Pi} = \int_{R_i} \frac{\left[\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Pi}(\xi_i) \right]^2}{f_{Pi}(\xi_i)} d\xi_i.$$

причому $f_{Di}(\xi_i)$ і $f_{Pi}(\xi_i)$ – густина розподілу ймовірностей похибок ліній положення відповідно по дистанції та пеленгу.

У разі нормального розподілу похибок ліній положення невідкладні інтеграли s_{Di} і s_{Pi} будуть дорівнювати [85]:

$$s_{Di} = \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} \text{ і } s_{Pi} = \frac{1}{\sigma_{Pj}^2},$$

де σ_{Dj}^2 і σ_{Pj}^2 – дисперсії похибок ліній положення дистанції і пеленга.

Для формування поля точності обсервації, що визначається сумарним впливом кількох орієнтирів, у кожній точці прибережної зони слід застосувати скалярну міру точності. Найбільш придатною характеристикою для цієї мети є дисперсія модуля векторної похибки D_{md} .

В роботі [106] приведений вираз для показника точності D_{md} для випадку вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтиру і розподілу похибок ліній положення за нормальним законом:

$$D_{md} = \frac{\sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pj}^2} \right)}{\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{1}{\sigma_{Di}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2} \right) \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} \sin^2 \beta_{ij} + \left(\frac{1}{\sigma_{Di}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2} \right) \frac{1}{\sigma_{Pj}^2} \cos^2 \beta_{ij} \right] \right\}}. \quad (4.1)$$

де N – число орієнтирів;

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

Враховуючи, що похибки ліній положення можуть розподілятися по змішаним законам першого і другого типу, то в цьому випадку величину D_{md} ,

розрахованого за формулою (4.1), необхідно розділити на значення ефективності e .

Для формування поля точності обсервації судна в районі його плавання виконано імітаційне комп'ютерне моделювання, яке полягало у розрахунку скалярної міри точності в кожній елементарній точці та візуалізації отриманого поля як напівпрозорого шару на вибраній електронній карті з урахуванням впливу декількох орієнтирів.

Спочатку відобразимо поля точності обсервації судна, яке виникає при використанні одного орієнтира, тобто по пеленгу і відстані. У цьому випадку показник точності D_{md1} виражається наступним чином:

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

На рисунку 4.1 приведено електронну карту району плавання судна, на якій відображається поле точності.

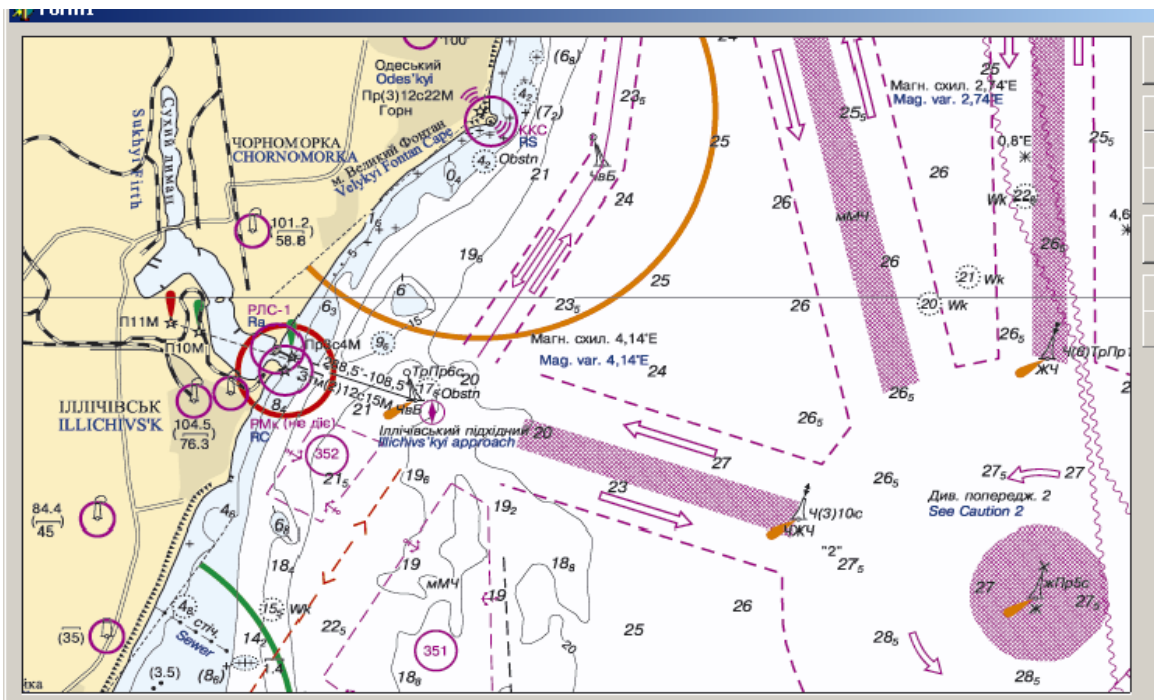


Рисунок 4.1 – Електронна карта району плавання судна

Поле точності обсервації судна, яке виникає при використанні одного орієнтира відображено на рисунку 4.2, а його оцифрування показано на рисунку 4.3.

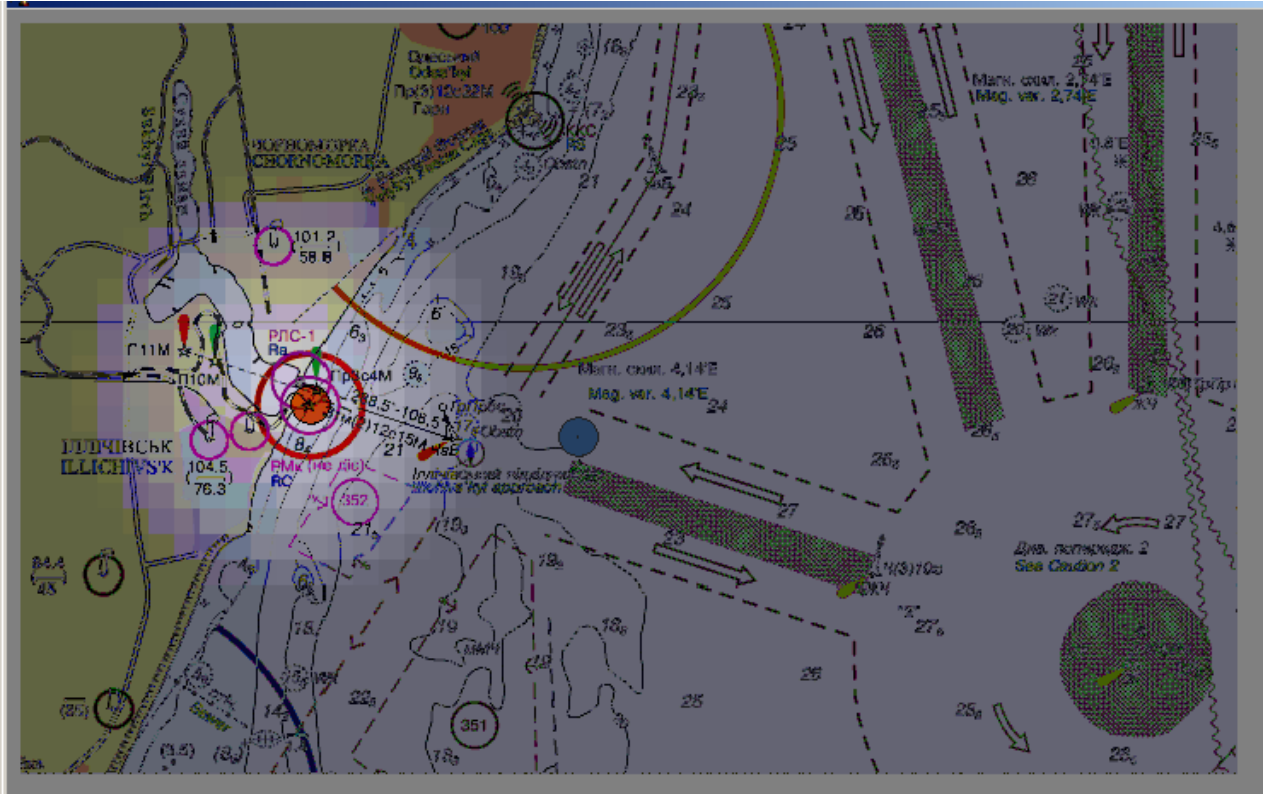


Рисунок 4.2 – Відображення поля точності для одного орієнтиру

Для розрахунку величини скалярного показника точності D_{md} приймалися значення $\sigma_D = 20$ м і $\sigma_p = 0,5^\circ D$.

Аналіз точності сформованого поля точності одного орієнтиру показує, що мінімальна дисперсія модуля траєкторної похибки у районі входу до порту становить 27 м^2 .

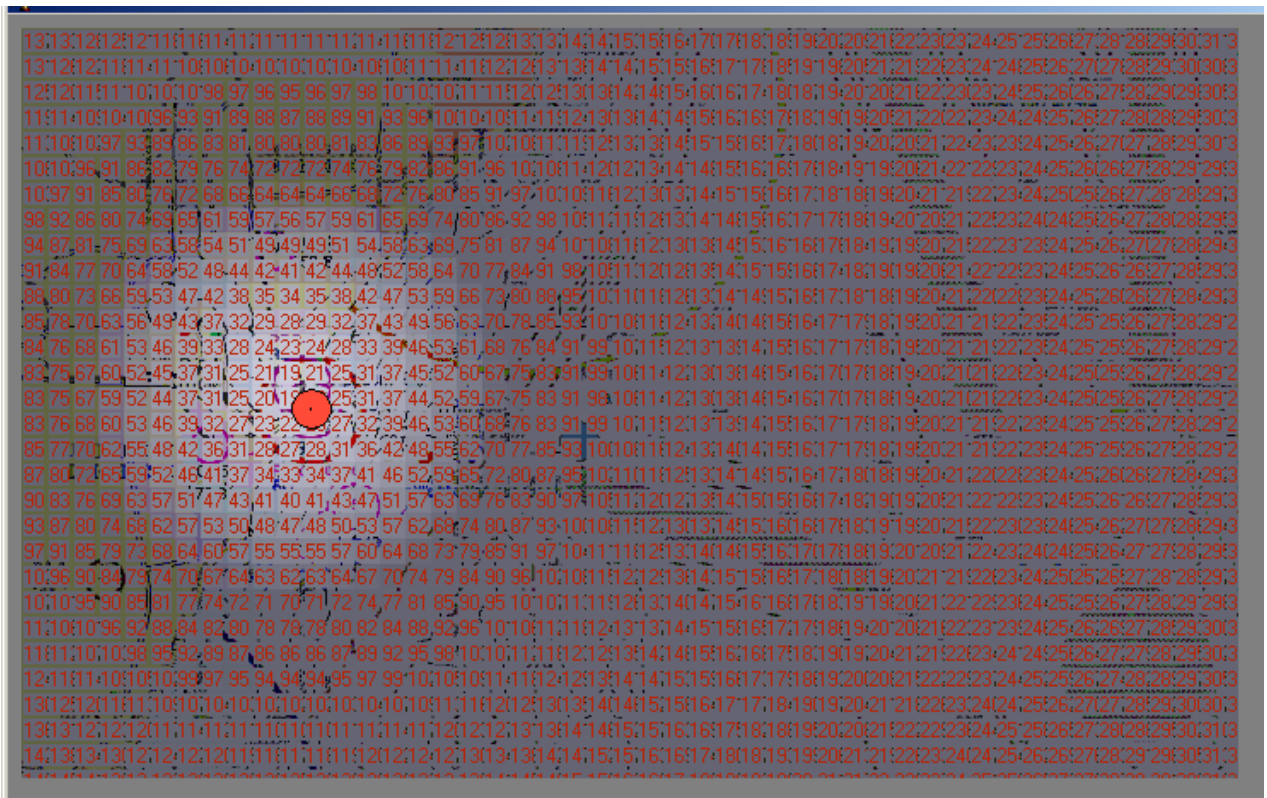


Рисунок 4.3 – Оцифрування поля точності для одного орієнтиру

Сформуємо поле точності, яке створюється двома орієнтирами, тобто по двох пеленгах і двох дистанцій. У цьому випадку, використовуючи вираз (4.1), показник точності для кожної точки на околиці судна виражається формулою:

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

За даним виразом розраховувався показник , величина якого визначає ступінь затінювання кожної елементарної ділянки та індикацію відповідного йому чисельного значення скалярного показника точності, як показано на рисунку 4.4 та рисунку 4.5.

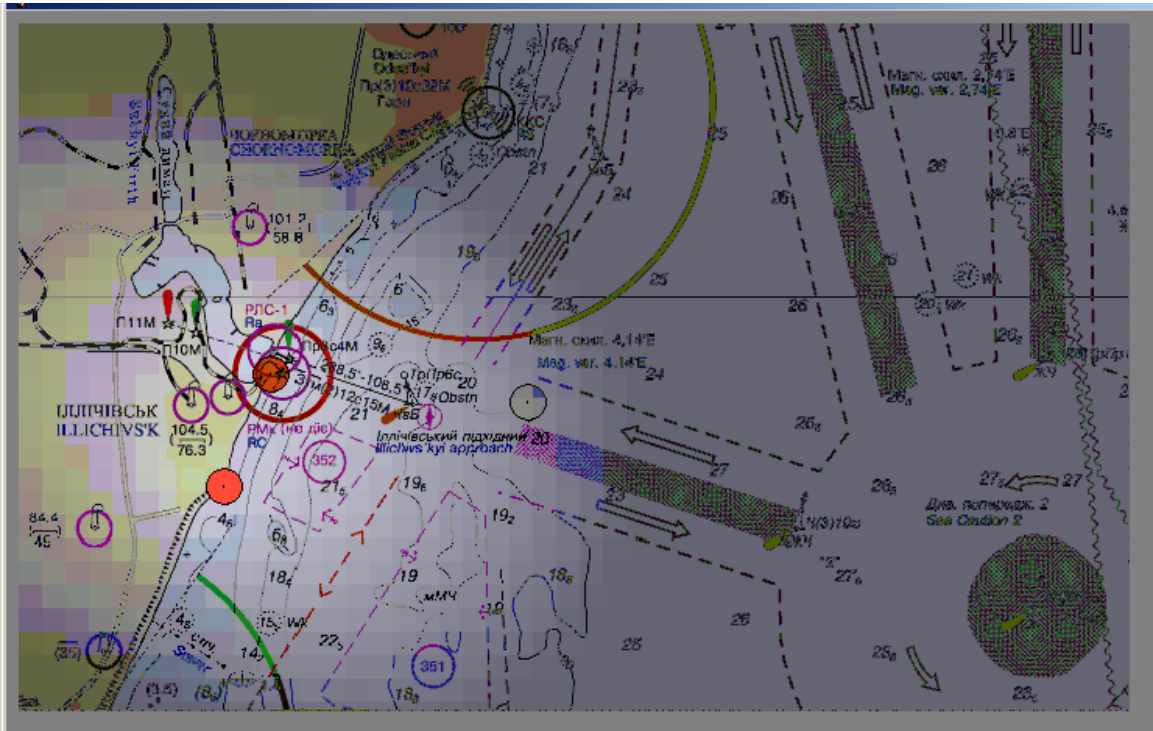


Рисунок 4.4 – Відображення поля точності для двох орієнтирів

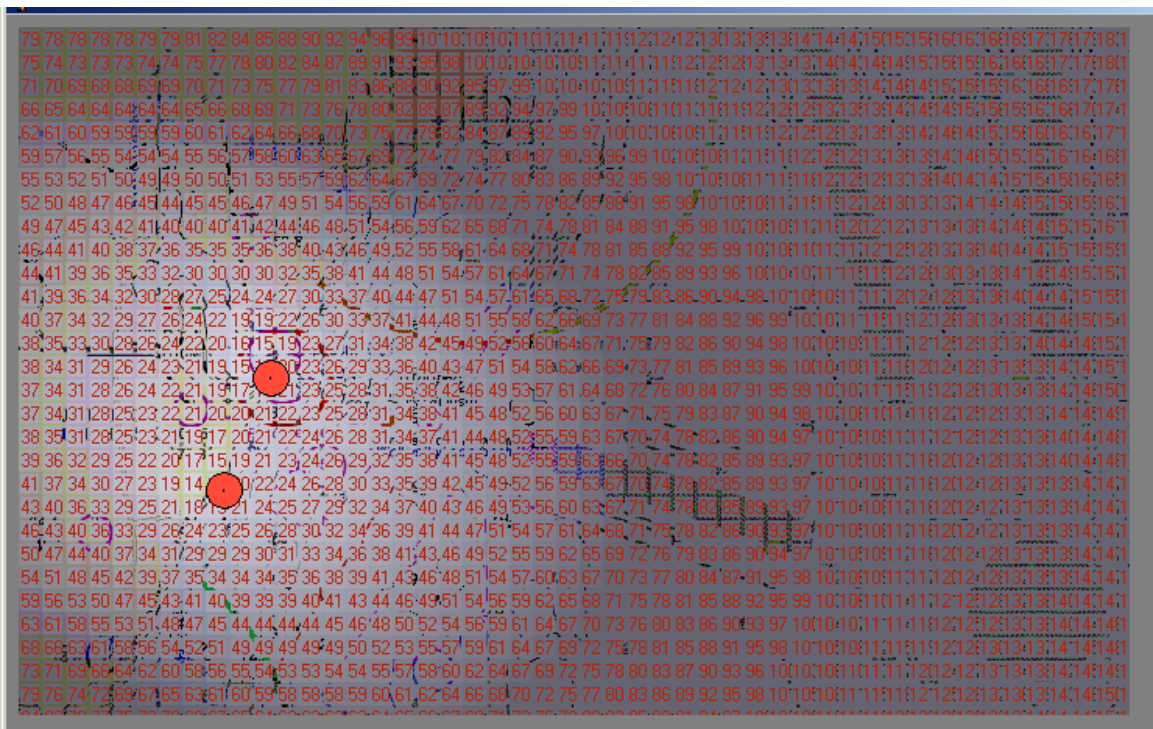


Рисунок 4.5 – Оцифрування поля точності для двох орієнтирів

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

Коли положення місця судна визначається за трьома орієнтирами, показник точності D_{md3} , який можна обчислити для будь-якої точки поблизу їхнього розміщення в межах району плавання, задається наступним аналітичним виразом:

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

де величини S та C визначаються з наступних формул:

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

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

За допомогою даного виразу розраховувався показник D_{md3} , причому відображення поля точності показано на рисунку 4.6 а індикація чисельного значення скалярного показника точності представлена на рисунку 4.7.

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

[illegible]

Рисунок 4.7 – Оцифрування поля точності для трьох орієнтирів

На рисунку 4.8 і рисунку 4.9 наведено графічний та чисельний розподіл поля точності чотирьох орієнтирів у заданому районі.

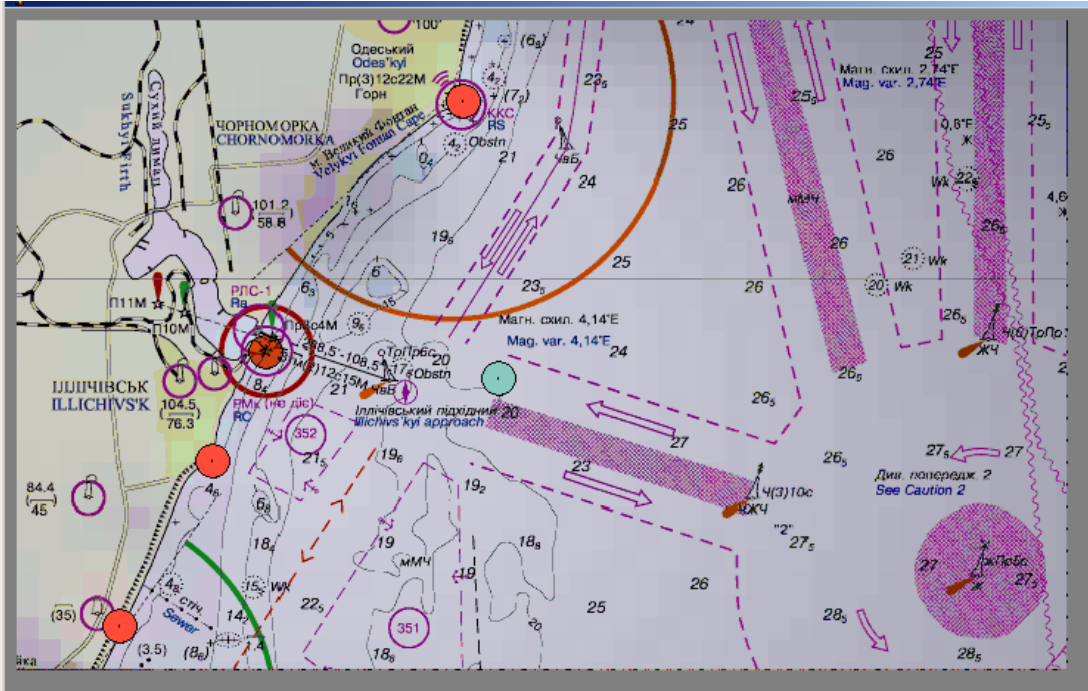


Рисунок 4.8 – Відображення поля точності для чотирьох орієнтирів

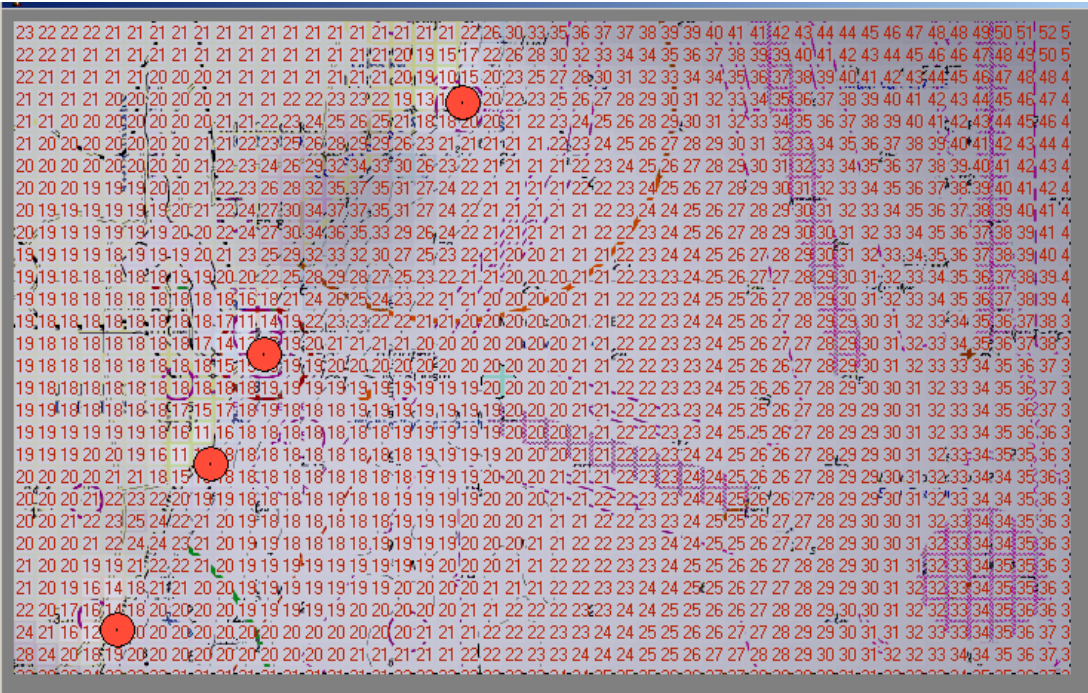


Рисунок 4.9. Оцифрування поля точності для чотирьох орієнтирів

Графічне відображення розподілу точностей у разі використання чотирьох орієнтирів показує зростання точності для точок всього району. Чисельне значення розподілу показує, що по всій електронній карті максимальне значення показника точності (дисперсії модуля векторної похибки) складає до 40 м^2 , що відповідає граничній похибці 18 м.

Вплив ризику навігаційної аварійності $\mathcal{R}_1$ можливо знизити шляхом підвищення точності обсервації. Цього можливо досягнути, якщо для розрахунку обсервованих координат при наявності надлишкових ліній положення використовується метод максимальної правдоподібності.

Якщо похибки ліній положення мають нормальний розподіл вірогідностей, то для розрахунку обсервованих координат потрібно застосовувати метод найменших квадратів. В цьому разі приріст координат ΔX_c і ΔY_c розраховується за допомогою виразів:

$$\Delta X_c = \frac{CD - BE}{AD - B^2}, \quad \Delta Y_c = \frac{AE - BC}{AD - B^2},$$

$$\text{де } A = \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{\sigma_i^2}, \quad B = \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i \sin \alpha_i}{\sigma_i^2}, \quad C = \sum_{i=1}^n \frac{\sin \alpha_i}{\sigma_i^2} r_i, \quad D = \sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} \quad i$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{\sigma_i^2} r_i, \text{ причому } \alpha_i \text{ і } r_i - \text{відповідно напрямки градієнту і перенос } i\text{-ї}$$

лінії положення, а σ_i^2 – дисперсія похибки лінії положення.

В разі розподілу похибок ліній положення за змішаними законами розрахунок обсервованих координат потрібно проводити методом максимальної правдоподібності, використовуючи співвідношення [93]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} \\ Y = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} (r_i - X \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)}} \\ \xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i. \end{array} \right.$$

Приведена система нелінійних рівнянь вирішується методом простих ітерацій, причому в якості початкового наближення приймаються $X = X_0$ і $Y = Y_0$.

Розглянемо використання оцінювання за максимальною правдоподібністю для визначення обсервованих координат судна у випадку, коли похибки ліній положення мають розподіл за узагальненим законом Пуассона. Щоб реалізувати цей підхід, потрібно побудувати функцію правдоподібності, скориставшись виразом для щільності:

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

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

В результаті розрахунків обсервованих координат проводиться за допомогою системи рівнянь (4.2), що приведена в статті [93].

Отримані вирази складають систему нелінійних рівнянь, яка вирішується методом простих ітерацій, причому в якості початкового наближення приймаються $X = X_0$ і $Y = Y_0$:

Спочатку в третє рівняння підставляють початкові наближення X і Y ; після цього ті самі величини та їхні значення ξ_i вводять у праві частини першого й другого рівнянь системи (4.2). У результаті одержують нові наближення шуканих змінних, які слугують вихідними даними для наступної ітерації. Обчислення обсервованих координат за надмірними лініями положення, похибки яких описуються узагальненим законом Пуассона, із застосуванням формули (4.2) дає мінімальну коваріаційну матрицю векторної похибки.

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sin \alpha_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} (r_i - Y \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}}; \\ Y &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} (r_i - X \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}}; \\ \xi_i &= X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i. \end{aligned} \right. \quad (4.2)$$

4.2. Компенсація ризику можливого зіткнення

Ризик зіткнення $\mathcal{R}_2$ можливо компенсувати, якщо визначити сектор небезпечних курсів, які викликають загрозу зіткнення, і курс ухилення вибирати із значень, що не належать до сектору небезпечних курсів. Сектор небезпечних курсів визначається безпечною зоною D_b .

Для безпечного розходження судна з небезпечною ціллю з урахуванням форми безпечної зони (домену) судно повинне вибрати граничний відносний курс, який є дотичним до безпечної зони. На рисунку 4.10 показано, що таких граничних курсів існує два: відносним ухиленням управо K_{ot}^s і відносним ухиленням вліво K_{ot}^p .

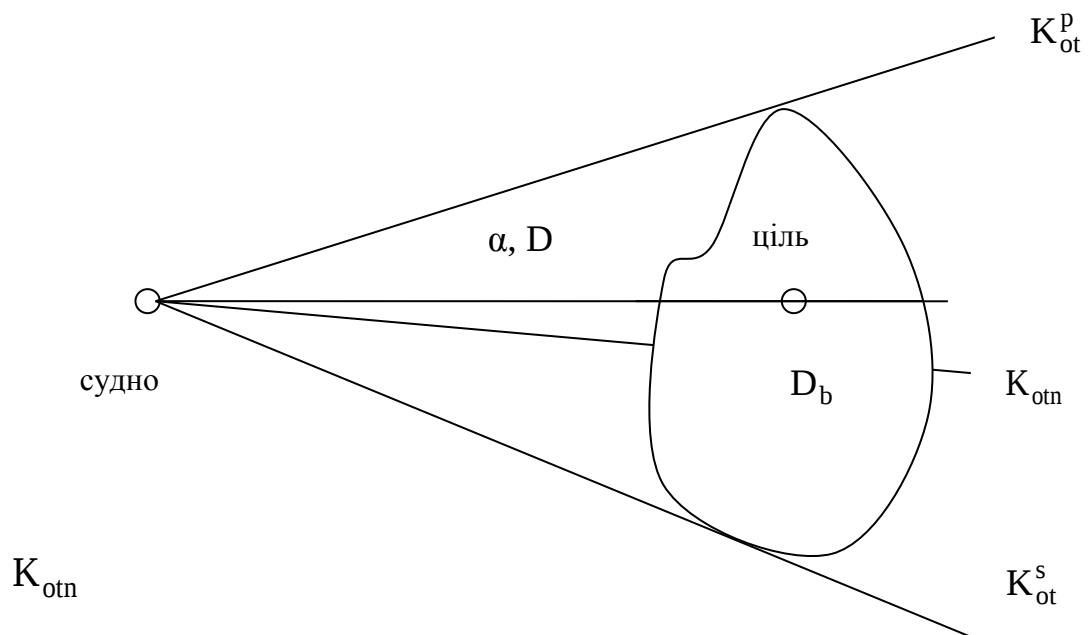


Рисунок 4.10 – Граничні відносні курси ухилення

Розглянемо спосіб визначення граничних відносних курсів для різних форм безпечної зони.

Незалежно від ракурсу цілі щодо судна дотична до межі безпечної кругової зони $D_b^{(Rd)}$ зберігає незмінне положення і залежить тільки від відносної позиції (рисунок 4.11).

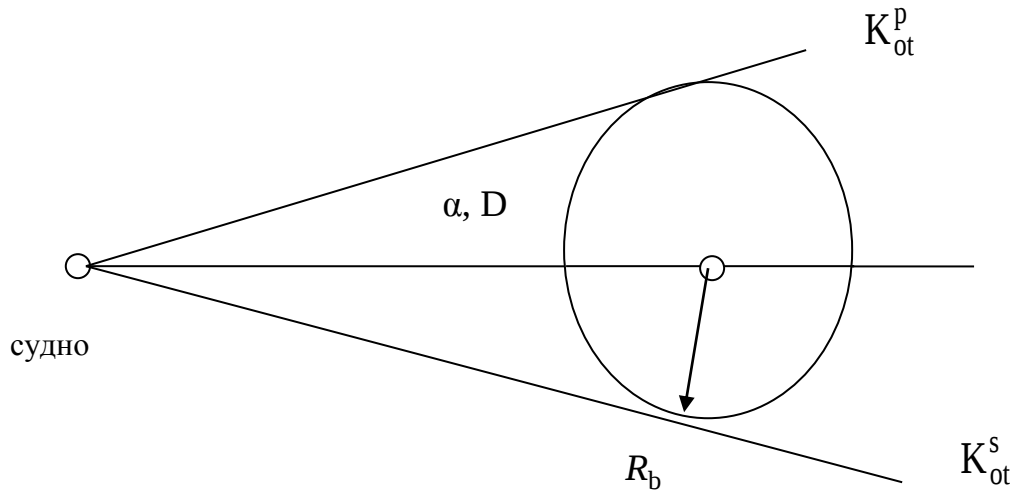


Рисунок 4.11 – Граничні відносні курси ухилення кругової зони $D_b^{(Rd)}$

З рисунку 4.11 значення граничних відносних курсів ухилення визначається очевидним співвідношенням:

$$\begin{aligned} K_{ot}^s &= \alpha + \arcsin \frac{R_b}{D}; \\ K_{ot}^p &= \alpha - \arcsin \frac{R_b}{D}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Розглянемо аналітичні вирази граничних відносних курсів ухилення для домену еліптичної форми, який позначимо $D_b^{(El)}$. У цьому випадку відносний курс мінімального ухилення K_{otymin} визначається дотичною до межі домену $D_b^{(El)}$, положення якої залежить від ракурсу цілі. У роботі [40] одержано вирази розрахунку граничних відносних курсів ухилення, які обчислюються таким чином:

$$\begin{aligned} K_{ot}^s &= \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}. \\ K_{ot}^p &= \min \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

В останньому виразі:

$$\begin{aligned}
\bar{K}_{ymin1} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin2} &= \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin3} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin4} &= \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},
\end{aligned} \tag{4.5}$$

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

$$x_1 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} + \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$x_2 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} - \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

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

Для врахування зміщення судна з центру еліпса слід обчислити величини:

$$\bar{X}_o = D_o \sin \alpha_o, \quad \bar{Y}_o = D_o \cos \alpha_o,$$

де $D_o = \sqrt{(\bar{X}_V + dL_e \sin K_c)^2 + (\bar{Y}_V + dL_e \cos K_c)^2}$;

$\alpha_o = 360 + \bar{\alpha}_n$, при $\bar{Y}_V + dL_e \cos K_c > 0$;

$\alpha_o = 180 + \bar{\alpha}_n$, при $\bar{Y}_V + dL_e \cos K_c < 0$, причому $\bar{\alpha}_n = \arctg \frac{\bar{X}_V + dL_e \cos K_c}{\bar{Y}_V + dL_e \cos K_c}$;

dL_e – відстань між центром еліпса і центром судна;

$\bar{X}_V$ та $\bar{Y}_V$ – координати цілі в опорній системі координат.

Підставляючи отримані значення $\bar{X}_o$ та $\bar{Y}_o$ в (4.5) розраховуємо значення $\bar{K}_{ymin}$ з урахуванням зміщення центру еліпсу відносно обсервованого місця цілі.

Розглянемо розрахунок граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(RE)}$ складної форми, який являє собою комбінацію половини еліпса і половини кола. Як раніше вказувалося, граничний відносний курс ухилення судна є дотичною з місця судна до безпечної домену цілі.

Як уже зазначалося, граничний відносний курс ухилення судна є дотичною з місця судна до безпечної зони цілі. У даному випадку складної зони $D_b^{(RE)}$, що представляє комбінацію половини еліпса і половини круга, залежно від курсового кута цілі $\beta = \alpha_c - K_c$ (α_c – пеленг з цілі на судно)

дотична з місця судна може бути до еліпса або до круга, як показано на рисунку 4.12.

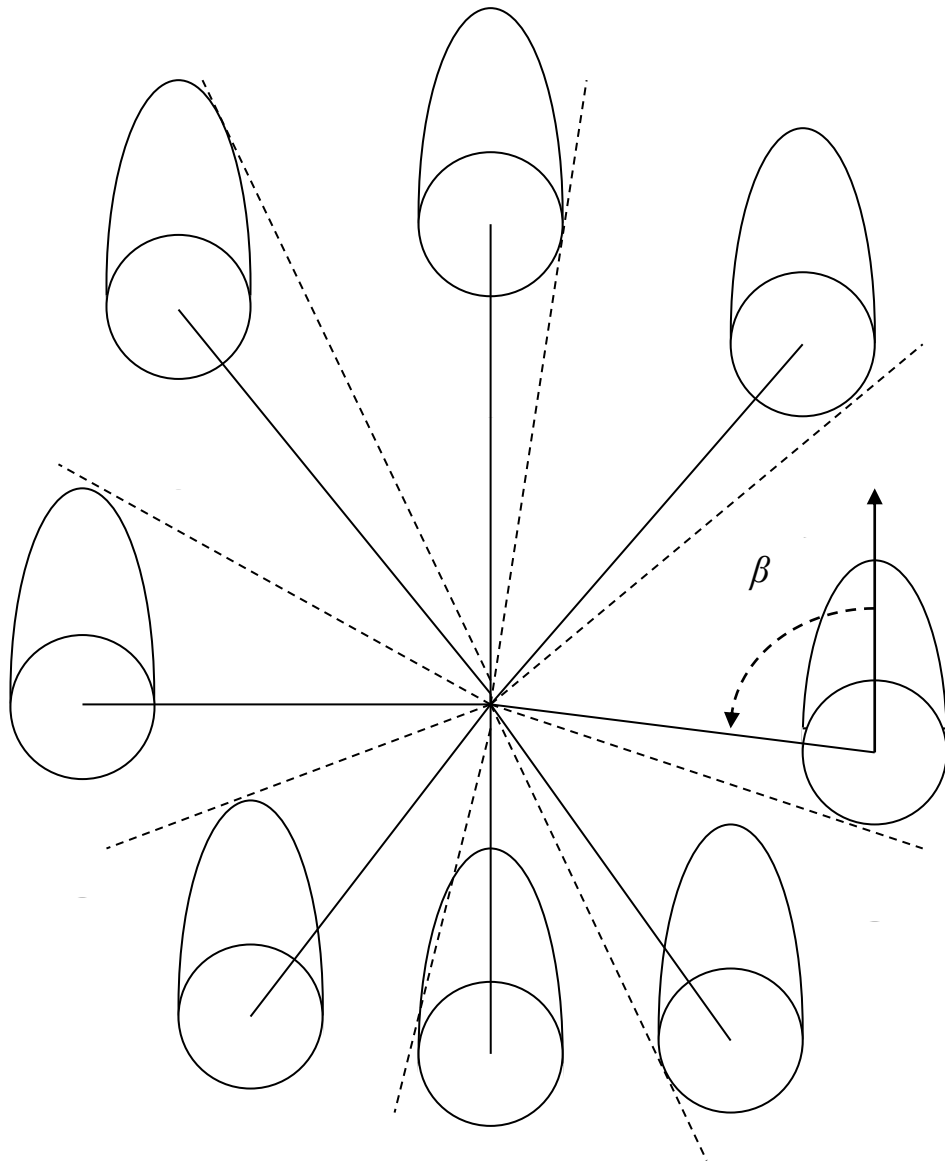


Рисунок 4.12 – Положення дотичної по відношенню до зони $D_b^{(RE)}$

Причому, як випливає з того ж рисунку 4.12, при курсових кутах лівого борту положення дотичної визначається довкруги, а якщо курсові кути цілі правого борту, то положення дотичної характеризується еліпсом. Отже,

мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ залежно від курсового кута цілі обчислюється по різних формулах.

У разі, коли дотична до півкола безпечної зони $D_b^{(RE)}$, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ обчислюється за формулою (4.1):

$$\bar{K}_{ymin} = K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}.$$

З аналізу даної формули виходить, що відносний курс $\bar{K}_{ymin}$ не залежить від курсу цілі K_c і його значення незмінне. Тому для курсових кутів цілі β лівого борту, що аналітично виражається нерівністю $\sin \beta < 0$, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ розраховується по приведеному виразу.

При курсових кутах цілі β правого борту, як впливає з рисунку 4.12, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ рівний дотичній до пів-еліпсу безпечної зони складної форми, причому умова реалізації курсового кута цілі β визначається нерівністю $\sin \beta > 0$.

У загальному випадку відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ визначається виразом [40]:

$$\bar{K}_{ymin} = \begin{cases} K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}, & \text{если } \sin \beta < 0, \\ \max\{\bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4}\}, & \text{если } \sin \beta > 0, \end{cases} \quad (4.6)$$

де $\bar{K}_{ymin1}$, $\bar{K}_{ymin2}$, $\bar{K}_{ymin3}$ и $\bar{K}_{ymin4}$ визначаються виразом (4.5).

Аналітичні вирази розрахунку граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми, який доцільно завдавати

відносно центру цілі чотирма кутовими точками A, B, C і D (рисунок 4.13), формуються наступним чином.

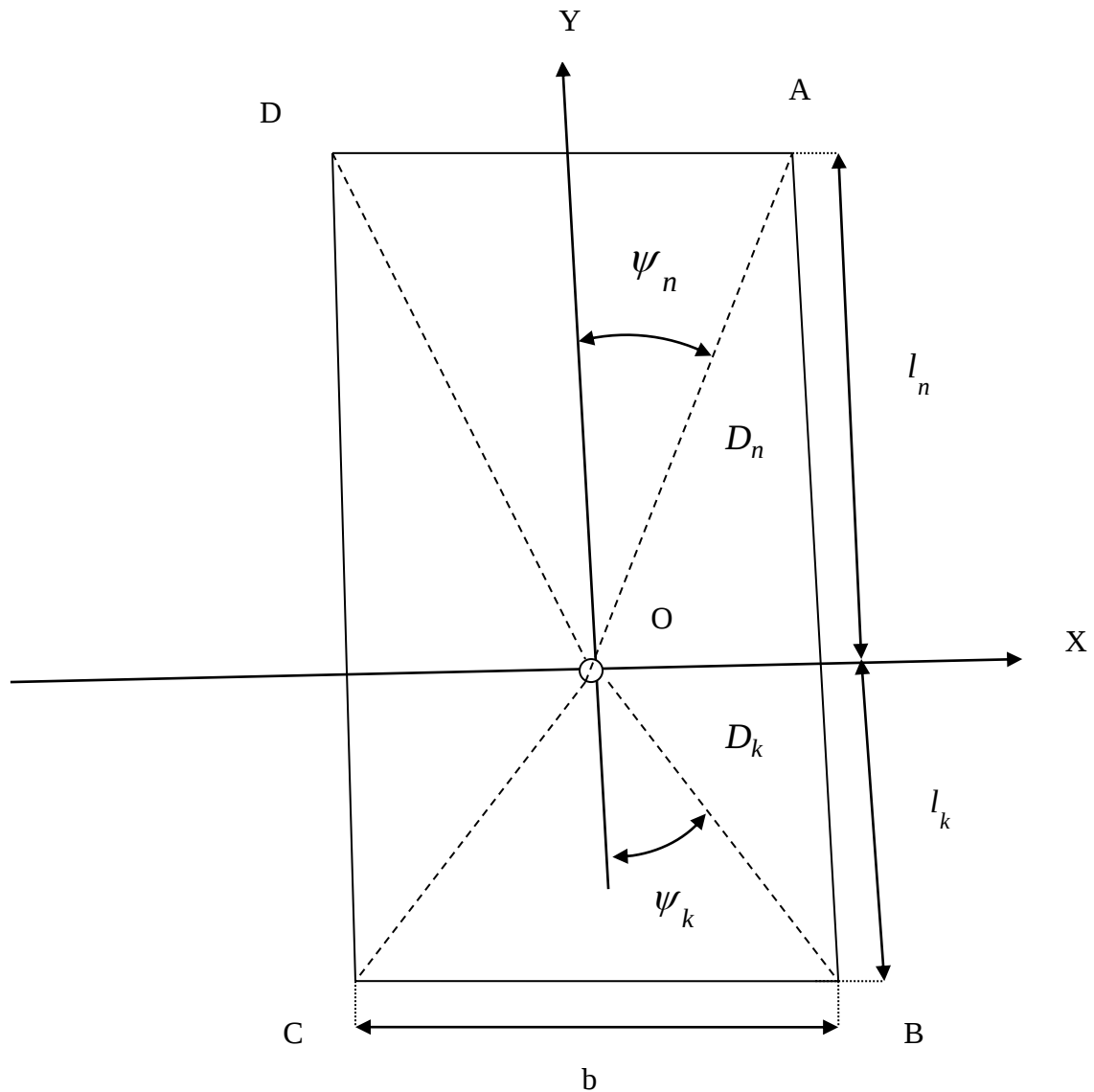


Рисунок 4.13– Параметри домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми

Положення кутових точок A, B, C та D відносно центру будемо задавати дистанціями D_n , D_k і кутами ψ_n , ψ_k , причому, як впливає з рисунок 4.13:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k},$$

$$D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, \quad D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

Як показано в роботі [4], граничні відносні курси ухилення $\bar{K}_{yminI}$ для безпечного домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми розраховуються за допомогою формул:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{yminI} &= 360 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I > 0; (I = A, B, C, D) \\ \tilde{K}_{yminI} &= 180 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I < 0, \end{aligned} \quad (4.7)$$

де $\bar{K}_{yminI}$ визначається наступним чином:

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.$$

Використовуючи отримані вирази, за допомогою формули (4.7) знаходимо значення відносних мінімальних курсів ухилення $\tilde{K}_{yminA}$, $\tilde{K}_{yminB}$,

$\tilde{K}_{yminC}$, $\tilde{K}_{yminD}$. Для вибору граничних відносних курсів ухилення K_{ot}^s та K_{ot}^p скористаємося наступними співвідношеннями:

$$K_{ot}^s = \max\{\tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}\}.$$

$$K_{ot}^p = \min\{\tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}\}.$$

Як показано в роботі [40], у цьому випадку залежність між істинним та відносним курсами судна характеризується такими виразами:

$$K_{2y*}^{(s)} = K_{ot}^{(s)} + \arcsin[p^{-1}\sin(K_1 - K_{ot}^{(s)})],$$

$$K_{2y*}^{(p)} = K_{ot}^{(p)} + \arcsin[p^{-1}\sin(K_1 - K_{ot}^{(p)})],$$

де $p = V_2 / V_1$, причому V_1 і V_2 швидкості суден, що зближаються, а також $V_2 < V_1$.

Тому при зближенні судна з небезпечною ціллю потрібно вибрати курс ухилення від зіткнення, який дорівнює граничному курсу $K_{2y*}^{(s)}$ або $K_{2y*}^{(p)}$.

4.3. Зниження бокового зміщення судна після маневру

Ризик навігаційних аварій $\mathcal{R}_3$ через появу бокового лінійного зміщення(бортове зміщення) і позиційної похибки при використанні пеленга для обсервації, який виникає внаслідок маневру судна, може бути суттєво знижений.

По-перше, слід дотримуватися рекомендації не визначати місце судна по гірокомпасним пеленгам протягом двох годин після закінчення маневру. По-друге, якщо мається можливість, маневр повороту проводити заздалегідь в разі проходження траєкторії поблизу мілини.

Але можливо запропонувати ще один спосіб зменшення бортового зміщення судна, ідея якого полягає у тому, що величина бортового зміщення щодо заданої траєкторії руху компенсується бортовим зміщенням з протилежним знаком, викликаним додатковою поправкою курсу. Враховуючи, що знак бортового зміщення після маневру судна змінює свою величину і знак, для його компенсації слідує додаткову поправку курсу змінити по величині і знаку кілька разів протягом інтервалу часу, при якому бортове зміщення досягає першого і другого максимального значення.

Розглянемо це питання детальніше, для чого звернемося до рисунку 4.14.

На приведеному рисунку зміна інерційної похибки після закінчення маневру показана на верхньому графіку. При цьому судно, слідуючи постійним курсом по гірокомпасу, через наявність сумарної інерційної похибки набуває бортового зміщення, характер якого приведений на середньому графіку.

Звертаємо увагу на те, що після закінчення маневру до моменту часу інерційна похибка має позитивне значення, як і бортове зміщення від відхилення судна управо, причому у момент часу t_1 бортове зміщення досягає максимального значення $d_{\max 1}$. Очевидно, на інтервалі часу $[0, t_1]$ для компенсації позитивного бортового зміщення необхідно вибрати негативну додаткову поправку курсу, причому її величина повинна бути такою, щоб до моменту часу t_1 судно знаходилося на програмній траєкторії.

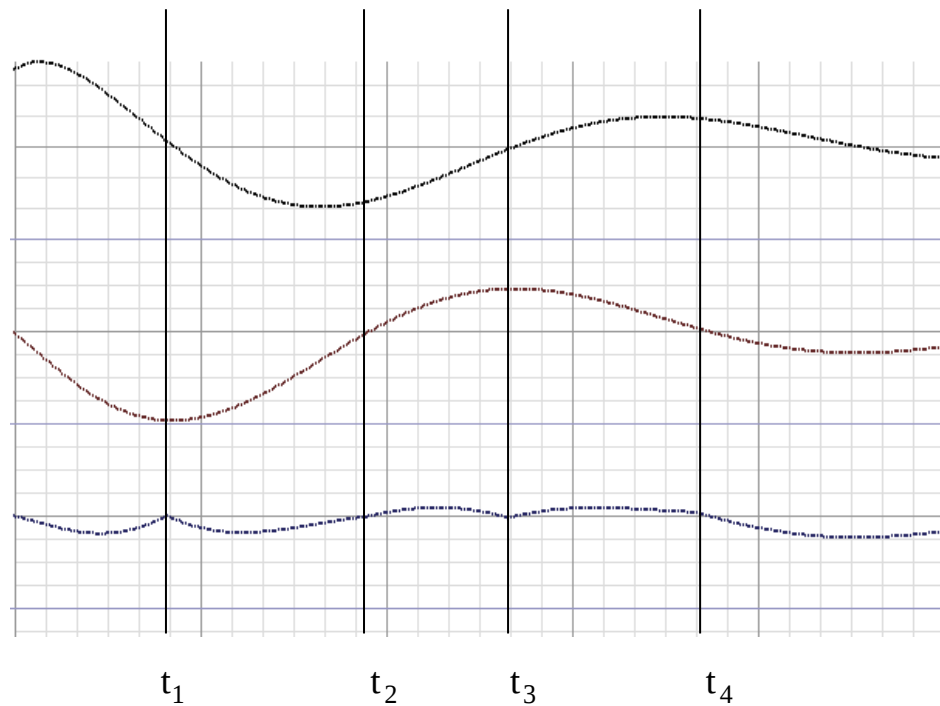


Рисунок 4.14 – До компенсації бортового зміщення судна

Виходячи з даної умови, додаткова поправка для компенсації бортового зміщення на інтервалі часу $[0, t_1]$ розраховується з наступного виразу:

$$dK_1 = -57.3 \operatorname{Arctg}\left(\frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c t_1}\right),$$

де V_c – швидкість судна у вузлах.

У одержаному виразі t_1 виражається в секундах, максимальний бортове зміщення $d_{\max 1}$ – в метрах.

На рисунку 4.14 на нижньому графіку показана залежність результуючого бортового зміщення d_Σ з урахуванням компенсації додаткової поправки dK_1 . З цього графіка видно, що до моменту часу t_1 значення d_Σ є рівним 0.

Після моменту часу t_1 сумарна інерційна девіація змінює знак, тому на інтервалі часу $[t_1, t_2]$ необхідно змінити величину і знак поправки dK_2 з

тим, щоб до моменту часу t_2 бортове зміщення d_Σ був рівний нулю. Очевидно, значення додаткової поправки dK_2 слід вибрати за допомогою виразу:

$$dK_2 = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[\frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c (t_2 - t_1)} \right].$$

Дійсно, з рисунок 4.14 виходить, що $d_\Sigma = 0$ у момент часу t_2 .

Другий максимальний зсув $d_{\max 2}$ знижується аналогічно введенням додаткових поправок dK_3 і dK_4 на інтервалах часу відповідно $[t_2, t_3]$ і $[t_3, t_4]$. Вказані поправки обертають сумарний бортове зміщення d_Σ в нуль в моменти часу t_3 і t_4 , як показано на рисунку 4.14. Значення додаткових поправок курсу dK_3 і dK_4 розраховуються за допомогою виразів:

$$dK_3 = -57.3 \operatorname{Arctg} \left[\frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_3 - t_2)} \right],$$

$$dK_4 = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[\frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_4 - t_3)} \right].$$

Поточне значення сумарного бортового зміщення $d_\Sigma(t)$ визначається наступною формулою:

$$d_\Sigma(t) = V_c \int_0^t \sin[\delta_j(s) + dK_i(s)] ds,$$

в якій сумарна інерційна девіація:

$$\delta_j(t) = (A_1 e^{-mt} + A_2 e^{-nt} \cos qt + A_3 e^{-nt} \sin qt) \Delta V_N,$$

а додаткова поправка курсу $dK_i(t)$ визначається виразом:

$$dK_i(t) = -57.3 \operatorname{Arctg}\left(\frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c t_1}\right), \text{ якщо } t \in [0, t_1];$$

$$dK_i(t) = 57.3 \operatorname{Arctg}\left[\frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c (t_2 - t_1)}\right], \text{ якщо } t \in [t_1, t_2];$$

$$dK_i(t) = -57.3 \operatorname{Arctg}\left[\frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_3 - t_2)}\right], \text{ якщо } t \in [t_2, t_3]; \quad (4.8)$$

$$dK_i(t) = 57.3 \operatorname{Arctg}\left[\frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_4 - t_3)}\right], \text{ якщо } t \in [t_3, t_4].$$

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

Для реалізації запропонованої процедури зниження бортового зміщення судна після маневру необхідно за допомогою комп'ютера побудувати криву залежності бортового зміщення від часу після закінчення маневру. Потім з кривою зняти значення першого $d_{\max 1}$ і другого $d_{\max 2}$ максимального зсуву, а також моменти часу t_1 , t_3 максимального значення бортового зміщення і моменти часу t_2 , t_4 перетворення бортового зміщення в нуль. За допомогою одержаних даних по формулі (4.8) розраховуються додаткові поправки курсу судна ($i = 1 \dots 4$), за допомогою яких проводиться компенсація бортового зміщення судна після маневру судна.

Порівнюючи на рисунку 4.14 графіки бортового зміщення від сумарної інерційної похибки (середній графік) і сумарного бортового зміщення, компенсованого додатковою поправкою (нижній графік), відзначаємо, що сумарне бортове зміщення зменшується у декілька разів, чим підтверджується ефективність запропонованої процедури підвищення точності судноводіння.

Відзначимо, що якщо додаткову поправку курсу змінювати по такому ж закону, як і сумарна інерційна похибка, але з протилежним знаком, тобто, те поточне значення бортового зміщення буде рівне нулю.

Щоб оцінити ефективність запропонованої процедури корекції бортового зміщення судна, створено комп'ютерний додаток, який обчислює часову криву сумарної інерційної похибки $\delta_j(t)$ та відображає її графічно. Програма також виконує розрахунки й будує графіки для бортового зміщення без компенсації $d(t)$, сумарного зміщення при частковій компенсації $d_\Sigma(t)$ та при повній компенсації (залежність від часу) $d_o(t)$. Для кожної з широт 0° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 75° і 80° були розраховані криві $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$, які представлені відповідно на рисунках 4.15...4.22.

На кожному з рисунків крива $\delta_j(t)$ представлена на першому (верхньому) графіку, крива $d(t)$ показана на другому графіку, на третьому графіку відображена крива $d_\Sigma(t)$, а на четвертому (нижньому) графіку представлена залежність $d_o(t)$.

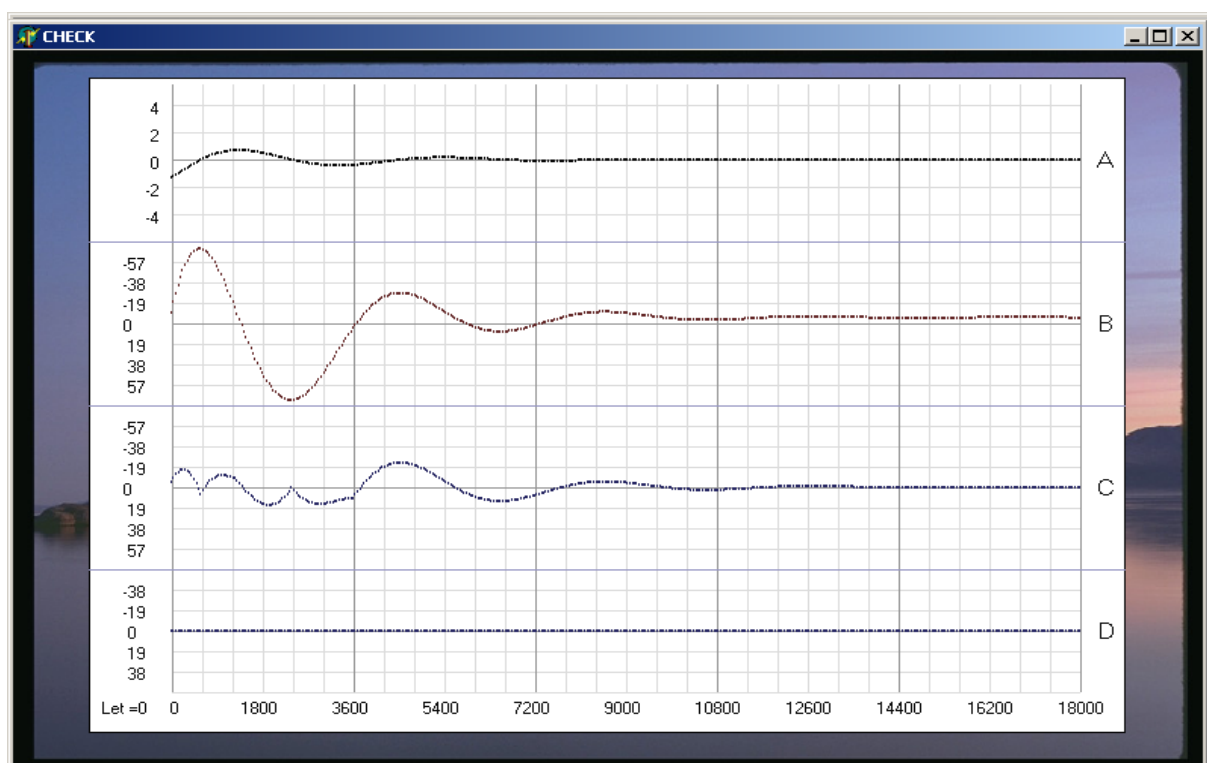


Рисунок 4.15 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 0°

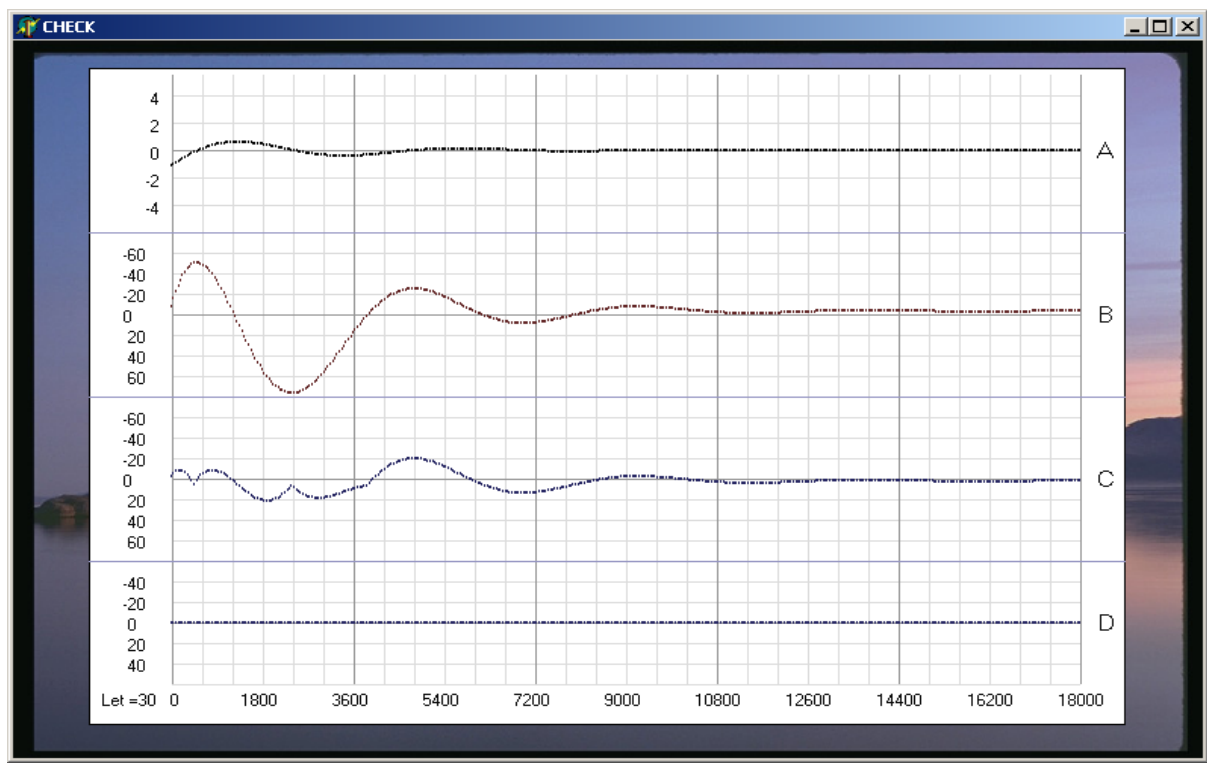


Рисунок 4.16 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 30°

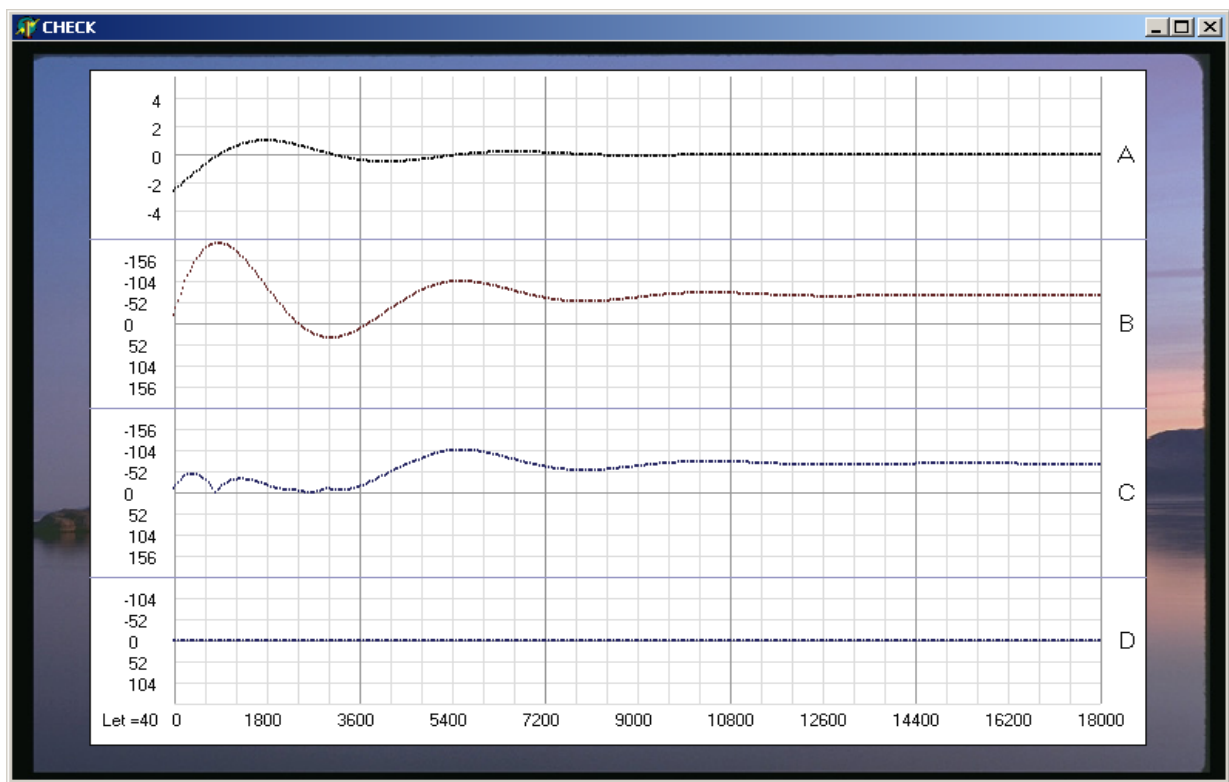


Рисунок 4.17 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 40°

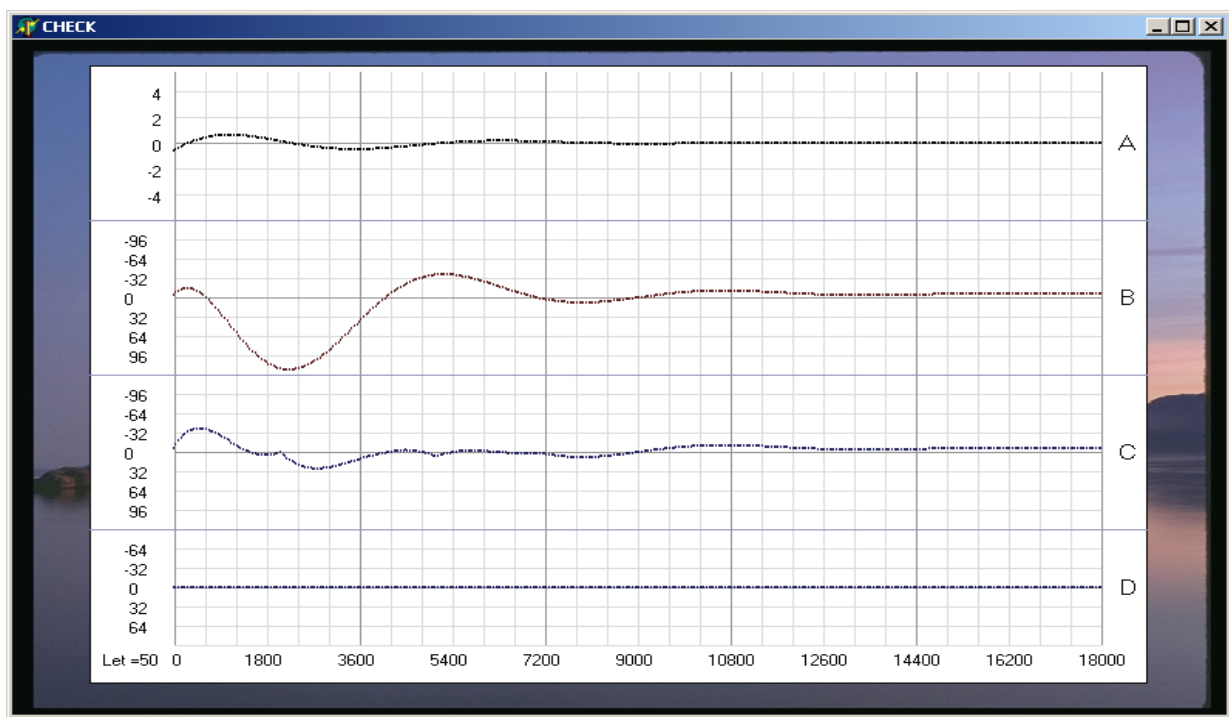


Рисунок 4.18 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 50°

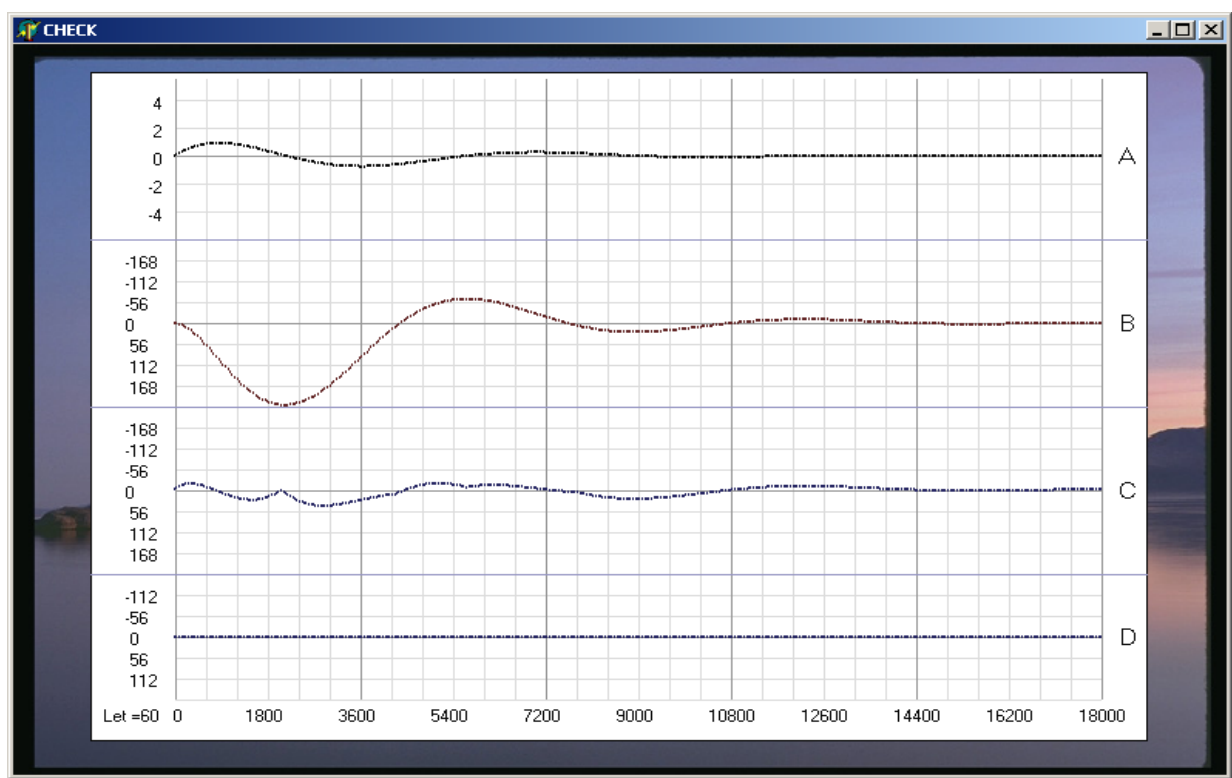


Рисунок 4.19 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 60°

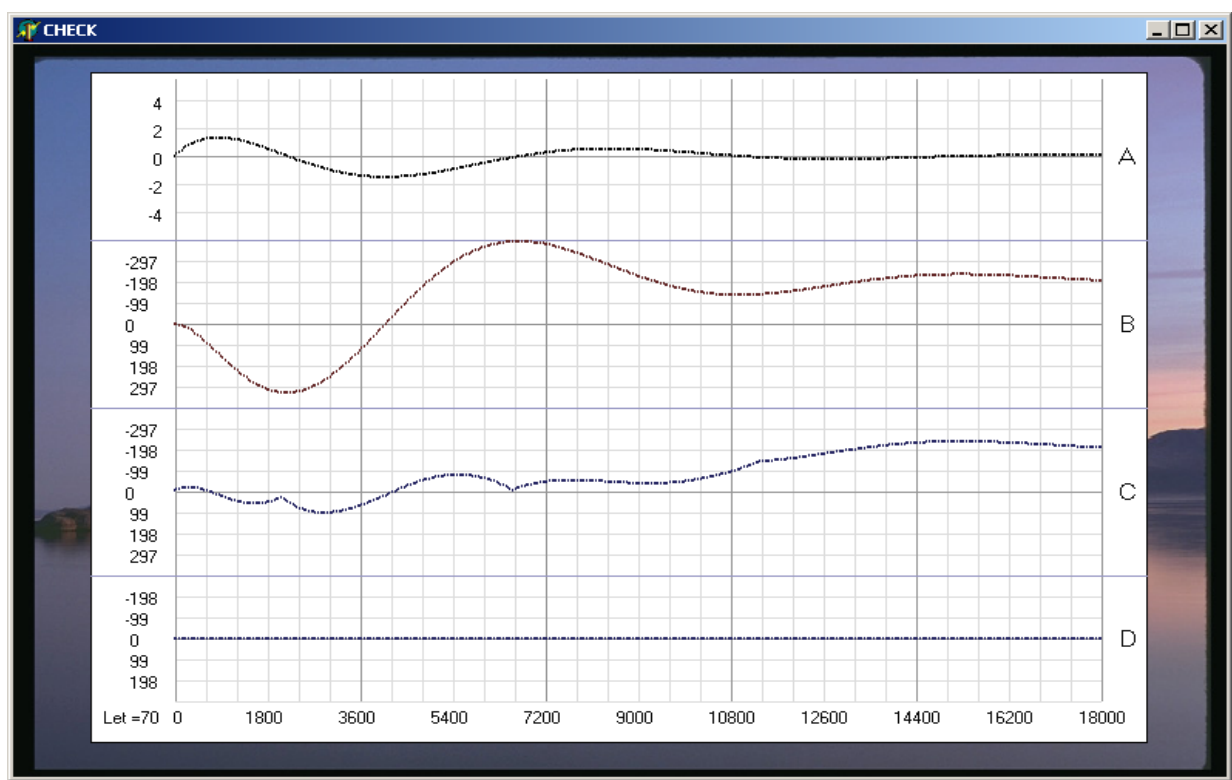


Рисунок 4.20 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 70°

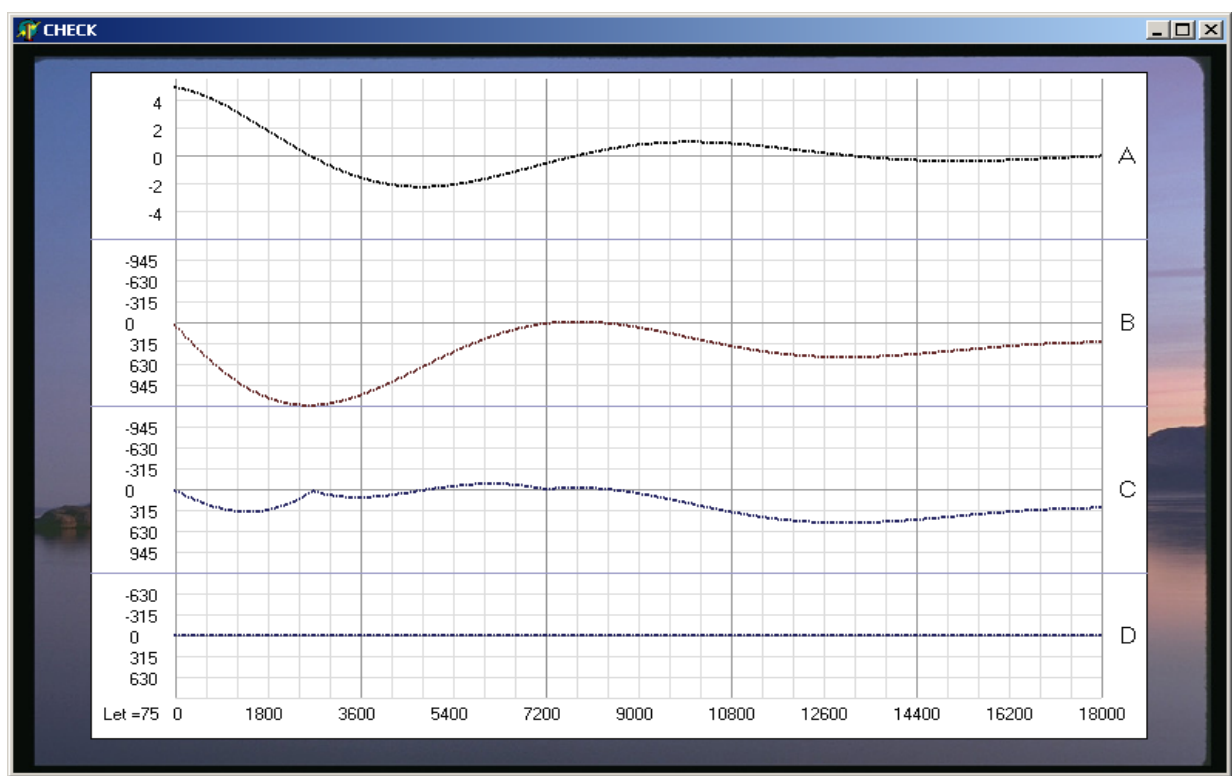


Рисунок 4.21 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 75°

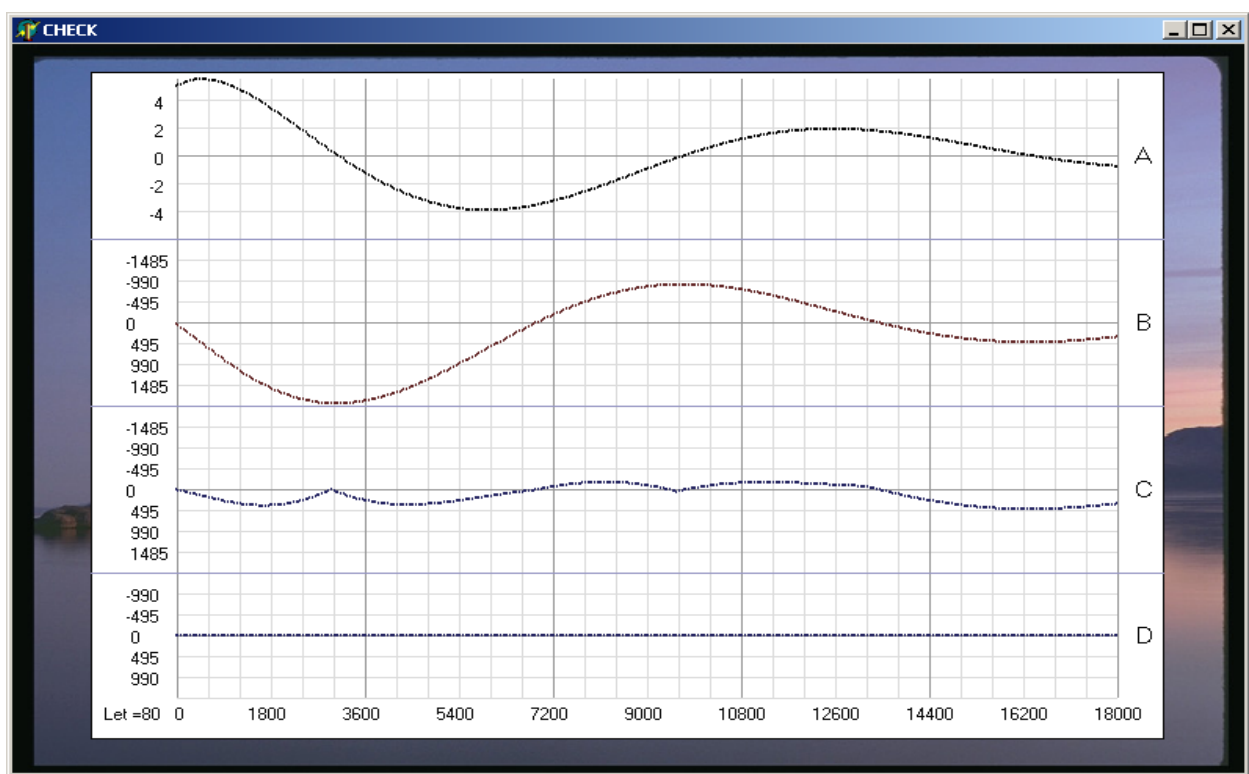


Рисунок 4.22 – Криві $\delta_j(t)$, $d(t)$, $d_\Sigma(t)$ і $d_o(t)$ для широти 80°

З вищенаведених результатів комп'ютерного графічного моделювання можна зробити наступні висновки:

1). Аналізуючи графіки сумарної інерційної похибки $\delta_j(t)$ і бортового зміщення без компенсації $d(t)$, звертаємо увагу на те, що максимальні значення девіацій і бортових зміщень без компенсації збільшуються із зростанням широти, так при широті 0° максимальних значень інерційної погрішності $\delta_{j\max} = 1^\circ$, а бічного зсуву без компенсації $d_{\max} = 75$ м. При широті рівній 80° згадані величин приймають значення $\delta_{j\max} = 6^\circ$ і $d_{\max} = 1980$ м.

2). При частковій компенсації сумарний бортове зміщення $d_\Sigma(t)$ зменшується приблизно в 5 разів, причому в моменти часу, коли $d(t)$ досягає максимального значення, сумарний бортове зміщення $d_\Sigma(t)$ обертається в нуль.

3). Бортове зміщення судна відсутній при змінній додатковій поправці курсу, яка визначається рівністю $dK(t) = -\delta_j(t)$.

4.4. Мінімізація систематичної векторіальної похибки повороту судна

З метою визначення адекватної моделі обертального руху проведено симуляції поворотних траєкторій із застосуванням експериментальних спостережень. Отримані в реальному режимі експлуатації відомості слугували базою для чисельного визначення інерційних характеристик суден

Для балкера Sheila Ann у реальних експлуатаційних умовах зібрано емпіричні дані з маневреності [20]. Порівняння смодельованих траєкторій із польовими спостереженнями показало, що найкращу відповідність забезпечує модель п'ятого типу. Моделі першого–третього типів

характеризуються суттєво нижчою точністю: їх середня квадратична похибка (СКП) та траєкторна помилка виявилися в 2–4 рази більшими порівняно з моделлю п'ятого типу, що відповідає збільшенню похибки приблизно на 27–125 м.

У роботі [107] проведено імітаційне моделювання повороту контейнеровоза «Oxford» з оцінкою траєкторної похибки на момент завершення маневру. У якості еталонної моделі, що відтворює реальний рух судна, прийнято найточнішу модель п'ятого типу, яка описує зміну курсу диференціальним рівнянням третього порядку з урахуванням часу перекладки керма (rudder time lag). За результатами імітацій повороту на 90° встановлено такі значення траєкторної похибки при прогнозуванні криволінійної траєкторії: для моделі першого типу — 150–200 м; для моделі другого типу — 35–40 м; для моделі третього типу — 25–30 м.

Таким чином, модель поворотності судна третього типу визнано оптимальною: за відносно простої структури вона забезпечує необхідну точність прогнозування (максимальна розбіжність експериментальної та модельної траєкторій становить 25–30 м).

Отже, для мінімізації систематичної векторної похибки під час маневрування доцільно застосовувати прогнозування траєкторії повороту на основі третьої динамічної моделі.

Третя динамічна модель зміни курсу судна K під час повороту формулюється у вигляді неоднорідного лінійного диференціального рівняння третього порядку зі сталими коефіцієнтами, та має наступний вигляд [108]:

$$T_1 T_2 \ddot{K} + (T_1 + T_2) \dot{K} + K = K_\omega \beta_k, \quad (4.9)$$

де T_1 і T_2 — постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна.

До розв'язання диференціального рівняння (4.9), як показано в роботі [105], можна застосувати метод дискретизації. Для цього на першій фазі повороту, тривалість якого Δt_k із диференціального рівняння (4.9) визначаємо курс судна:

$$K = K_o + a_{\omega} \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}, (4.10)$$

де $a_{\omega} = K_{\omega} \beta_k$.

Формула для поточного курсу судна на другій фазі повороту $\tilde{K}$ знайдемо так:

$$\begin{aligned} \tilde{K} = K - a_{\omega} t + a_{\omega} \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2), \end{aligned} \quad (4.11)$$

Формули (4.10) та (4.9) дозволяють отримати вираз для значення приросту курсу ΔK під час повороту. Проте попередньо потрібно записати аналітичні вирази для курсу на першій фазі повороту $K(\Delta t_k)$ та на другій фазі $\tilde{K}(\Delta t)$.

Підставивши значення Δt_k в вираз (4.10), отримуємо:

$$K(\Delta t_k) = a_{\omega} \{ \Delta t_k - \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}.$$

Аналогічно, підстановка Δt в (4.10) дозволяє отримати формулу для збільшення курсу на другій фазі повороту $\tilde{K}(\Delta t)$:

$$\tilde{K}(\Delta t) = -a_{\omega} \Delta t + a_{\omega} \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times$$

$$\{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_2)]\} / (T_1 - T_2).$$

Підставивши отримані вирази в формулу збільшення курсу $\Delta K = K(\Delta t_k)$ + $\tilde{K}(\Delta t)$, і отримаємо наступну рівність:

$$\begin{aligned} \Delta K/a_\omega = \Delta t_k - \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \Delta t + \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

З останнього виразу формуємо залежність Δt_k від Δt :

$$\begin{aligned} \Delta t_k = \Delta t + \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ - \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \quad (4.12) \\ \{T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K/a_\omega. \end{aligned}$$

Формуємо друге рівняння шляхом підстановки в нього початкового та усталеного значень кутової швидкості другої фази повороту і прирівнюємо отримане співвідношення до нуля, тобто:

$$\begin{aligned} \omega(\Delta t_k, \Delta t) = a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ [T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)] / (T_1 - T_2) - a_\omega = 0. \end{aligned}$$

Далі, після перетворень, отримаємо

$$\begin{aligned} [T_1 \exp(-\Delta t/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t/T_2)] = (T_1 - T_2) \times \\ \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1}, \end{aligned}$$

Остання рівність дає змогу записати подання, яке зручне при застосуванні методу простих ітерацій:

$$\exp(-\Delta t/T_1) = (T_2/T_1)\exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] \times \\ \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\}^{-1}.$$

Після логарифмування правої і лівої частини останньої рівності і нескладних перетворень, отримаємо рівняння, яке зв'язує Δt_k з Δt :

$$\Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2/T_1)\exp(-\Delta t/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] L^{-1} \}. \quad (4.13)$$

де $L = 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)$,

Отже, для обчислення величин Δt_k і Δt методом простих ітерацій, задавши попереднє значенням Δt_k , за формулою (4.12), знайдемо значення Δt , яке потім підставляють у відповідний вираз для визначення наступного значення Δt_{k+1} .

Вирази для обчислення приростів координат судна Δx_o и Δy_o за час повороту t мають вигляд:

$$\Delta x_o = V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \\ - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin \{ a_\omega \{ t - \\ - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt +$$

$$\begin{aligned}
& + V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\
& a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\
& \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt + \\
& + V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\
& a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\
& \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned}
\Delta y_o &= V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_\omega \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \\
& - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\} \} dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t_k} \sin \{ a_\omega \{t - \\
& - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\} \} dt + \\
& + V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\
& a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\
& \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt - \\
& - V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\
& a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\
& \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Таким чином виконується обчислення приростів координат судна під час його повороту з урахуванням третьої динамічної моделі руху за кутом рискання. Далі визначим момент початку повороту t_n за допомогою формули:

$$t_n = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1},$$

де координата x_c :

$$x_c = \frac{\Delta y_o - \Delta x_o \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}.$$

В цьому разі досягається мінімізація систематичної векторіальної похибки повороту судна.

4.5. Висновки до четвертого розділу

В розділі розглянуто міри по зниженню негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій. Запропоновано різні способи покращання безпеки судноводіння, які знижують результати дії основних ризиків.

Показано, що урахування похибок навігаційних вимірювань можливе шляхом формування поля точності, яке створюється навігаційними орієнтирами. Для характеристики поля точності запропоновано скалярний показник.

Компенсація ризику можливого зіткнення передбачає в ситуації небезпечного зближення судна з ціллю визначення сектору небезпечних

курсів ухилення, величина якого залежить від форми судової безпечної області.

Для зменшення бортового зміщення судна відносно заданої траєкторії руху, що виникає після маневру, у розділі запропоновано два способи керування, застосування яких істотно знижує або повністю усуває це зміщення.

Мінімізація систематичної похибки повороту судна. досягається в разі вибору відповідної моделі обертального руху судна для прогнозу траєкторії його повороту. В розділі приведені аналітичні вирази для розрахунку моменту часу початку повороту судна.

РОЗДІЛ 5

КОМПЛЕКСНЕ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ СУТТЄВИХ РИЗИКІВ НАВІГАЦІЙНИХ АВАРІЙ РОЗРОБКОЮ СУДОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

5.1. Алгоритм відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі

Алгоритм методу відображення навігаційної ситуації містить низку операцій, аналітичний опис яких наведено у двох попередніх розділах. Надалі наведемо результуючі аналітичні вирази, що дозволяють описати суттєві параметри навігаційної ситуації, які враховують основні ризики навігаційної аварійності та вплив їх на безпеку судноводіння.

Для візуалізації точності в районі плавання на електронній карті спочатку визначають набір орієнтирів, що використовуються для контролю положення судна. Потім для кожної точки району, з урахуванням кількості та геометрії розміщення орієнтирів, розраховується значення показника точності D_{md} .

У разі, коли обсервації судна виконуються щодо одного орієнтира — його пеленга та дистанції, показник точності D_{md1} обчислюється за формулою:

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

Оскільки дисперсії ліній положення σ_D^2 та σ_P^2 зростають зі збільшенням дистанції між судном і орієнтиром, величина показника точності D_{md1} визначається виключно цією дистанцією.

Якщо для визначення місця судна обираються два орієнтири (два пеленги й дві дистанції), то показник точності D_{md2} для кожної точки району плавання обчислюється за допомогою аналітичного виразу:

Так як дисперсії ліній положення і зростають із зростанням дистанції між судном та орієнтиром, то величина показника точності залежить тільки від цієї дистанції.

Якщо визначення місця судна вибирається два орієнтира (два пеленга і дві дистанції), то показник точності кожної точки району плавання розраховується з допомогою аналітичного виразу:

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

Значення D_{md2} залежить від дисперсій ліній положення σ_{D1}^2 , σ_{D2}^2 , σ_{P1}^2 і σ_{P2}^2 , а й від кута β_{12} між орієнтирами, визначеного з точки, де визначається значення показника точності.

В разі використання трьох орієнтирів для визначення місця судна показник точності D_{md3} обчислюється за формулою:

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

де значення S та C визначаються з наступних формул:

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

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

Кути β_{12} , β_{13} і β_{23} позначають кути між відповідними парами орієнтирів у точці, для якої обчислюється значення D_{md3} .

При маневруванні судна необхідно провести оцінку розмірів смуги, що виникає у зв'язку з лінійним зміщенням судна від програмної з програмної траєкторії руху. Для цього необхідно задати тип гірокомпасу, який встановлений на судні, що маневрує. Якщо це гірокомпас із твердим маятником, то необхідно визначити моменти першого та другого максимальних зносів, якими є два перші корені рівняння:

$$t_{\max 1(1,2)} = \frac{1}{\omega_d} \left\{ \arcsin \left[-\frac{A}{C} e^{(h-m)t_{\max 1(1,2)}} \right] - \psi \right\}.$$

Шукані величини $t_{\max 1(1,2)}$ визначаються методом простих ітерацій.

Перший d_{11} і другий d_{12} максимальні зміщення розраховуються відповідно за допомогою формул:

$$d_{11} = V_2 \Delta V_N \left\{ \frac{A}{m} (1 - e^{-mt_{\max 11}}) - \frac{C}{\omega_d^2 + h^2} [h(e^{-ht_{\max 11}} \sin(\omega_d t_{\max 11} + \psi) - \sin \psi) + \right.$$

$$+\omega_d(e^{-ht_{\max 11}}\cos(\omega_d t_{\max 11}+\psi)-\cos\psi)]\},$$

$$d_{12}=V_2\Delta V_N\left\{\frac{A}{m}(1-e^{-mt_{\max 12}})-\frac{C}{\omega_d^2+h^2}[h(e^{-ht_{\max 12}}\sin(\omega_d t_{\max 12}+\psi)-\sin\psi)+\right. \\ \left.+\omega_d(e^{-ht_{\max 12}}\cos(\omega_d t_{\max 12}+\psi)-\cos\psi)]\right\}.$$

Ширина смуги можливого усунення d_1 при першому типі гірокомпасу визначається з виразу:

$$d_1=|d_{11}|+|d_{12}|.$$

Якщо на судні знаходиться коригований гірокомпас з непрямым керуванням чутливого елемента, то моменти першого $t_{\max 21}$ та другого $t_{\max 22}$ максимальних зносів визначаються за допомогою рівняння:

$$t_{\max 2(1,2)}=\frac{1}{\omega_d}\{\arcsin[-\frac{N}{M}e^{(h-m)t_{\max 2(1,2)}}]-\psi\},$$

а максимальні знесення d_{21} і d_{22} розраховуються відповідно за допомогою відповідних аналітичних виразів:

$$d_{21}=V^2\omega\left\{\frac{N}{m}(1-e^{-mt_{\max 21}})+\frac{M}{\omega_d^2+h^2}[e^{-ht_{\max 21}}(h\sin(\omega_d t_{\max 21}+\psi)+\omega_d\cos(\omega_d t_{\max 21}+\psi))- \right. \\ \left.-h\sin\psi-\omega_d\cos\psi]\right\},$$

$$d_{22}=V^2\omega\left\{\frac{N}{m}(1-e^{-mt_{\max 22}})+\frac{M}{\omega_d^2+h^2}[e^{-ht_{\max 22}}(h\sin(\omega_d t_{\max 22}+\psi)+\omega_d\cos(\omega_d t_{\max 22}+\psi))- \right. \\ \left.-h\sin\psi-\omega_d\cos\psi]\right\}.$$

Ширина смуги лінійного зміщення d_2 другого типу гірокомпасу визначається з наступного виразу:

$$d_2 = |d_{21}| + |d_{22}|.$$

В разі небезпечного зближення судна з цілю слід визначити сектор недопустимих курсів ухилення, для чого використовуючи значення допустимої дистанції L_d , розраховуються граничні значення відносних курсів K_{ots} та K_{otr} за допомогою співвідношень:

$$K_{ots} = \alpha_n + \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right),$$

$$K_{otr} = \alpha_n - \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right),$$

де α_n – початковий пеленг на ціль;

L_n – початкова дистанція до цілі.

Якщо швидкість судна менша за швидкість цілі, то екстремальні значення відносного курсу обчислюються за такими аналітичними виразами:

$$K_{otmin} = \pi + K_c - \arcsin(p),$$

$$K_{otmax} = \pi + K_c + \arcsin(p).$$

У разі істинності нерівностей $\sin(K_{\text{otmax}} - K_{\text{ots}}) < 0$ і $\sin(K_{\text{otmin}} - K_{\text{отр}}) > 0$ межі сектора небезпечних курсів розраховуються за такими формулами:

$$K_{\text{оп}} = \alpha_n - \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right) + \arcsin\left\{\rho^{-1} \sin\{K_c - [\alpha_n - \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right)]\}\right\},$$

$$K_{\text{ос}} = \alpha_n + \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right) + \arcsin\left\{\rho^{-1} \sin\{K_c - [\alpha_n + \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right)]\}\right\}.$$

Якщо наведені вище нерівності не виконуються, то розрахунок граничних небезпечних курсів проводиться в наступному порядку. При справедливості співвідношення $\sin(K_{\text{otmax}} - K_{\text{ots}}) < 0$ та $\sin(K_{\text{otmin}} - K_{\text{отр}}) < 0$ при відносному ухиленні вправо можлива безпечне розходження судна з ціллю, причому граничним курсом судна є:

$$K_{\text{ос}} = \alpha_n + \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right) + \arcsin\left\{\rho^{-1} \sin\{K_c - [\alpha_n + \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right)]\}\right\}.$$

При реалізації ситуації, у якій нерівності $\sin(K_{\text{otmax}} - K_{\text{ots}}) > 0$ і $\sin(K_{\text{otmin}} - K_{\text{отр}}) > 0$ є справедливими, безпечне розходження судна з ціллю можливого відносного ухилення вліво за граничний курс судна:

$$K_{\text{оп}} = \alpha_n - \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right) + \arcsin\left\{\rho^{-1} \sin\{K_c - [\alpha_n - \arcsin\left(\frac{L_d}{L_n}\right)]\}\right\}.$$

У випадку, коли мають місце нерівності $\sin(K_{\text{otmax}} - K_{\text{ots}}) > 0$ та $\sin(K_{\text{otmin}} - K_{\text{otp}}) < 0$, курс судна визначається співвідношеннями:

$$K_{\text{omin}} = K_{\text{c}} + \arccos(\rho) \quad \text{або} \quad K_{\text{omax}} = K_{\text{c}} - \arccos(\rho).$$

Залежно від того, при якому досягається максимальна дистанція найкоротшого зближення. В якості зони безпеки судна використовується еліпс, зі зміщеним центром щодо центру мас судна – по носу судна зона становить близько 10 довжин судна, по кормі – близько 3-4 довжин, по траверзах – близько п'яти довжин судна. Таким чином, проводиться розрахунок параметрів навігаційної ситуації, яка відображається на електронній карті судової інформаційної системи.

5.2. Імітаційне моделювання відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі

Для перевірки можливості реалізації методу відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі було розроблено імітаційну модель, що представляє програмний продукт, написаний мовою високого рівня Delphi. Програма імітує судову інформаційну систему, яка відображає навігаційну ситуацію згідно з представленим у попередньому підрозділі алгоритмом.

Оскільки вся інформація, що характеризує поточну навігаційну ситуацію, пов'язані з графічним поданням, то основою інтегрованого відображення навігаційної ситуації є електронна карта району плавання судна. В інформаційній системі на електронній карті відображаються поточні

позиції судна та найближчих цілей. В імітаційній моделі передбачено введення початкової позиції судна та цілі, а також їх параметрів руху.

Для імітаційного моделювання передбачено використання трьох електронних карт, в якості яких обрано підходи до портів Севастополь, Чорноморськ та Феодосія. За замовчуванням виводиться електронна карта підходів до порту Чорноморськ, причому на крайній нижній кнопці з'являється напис «Карта_1», а на інформаційній панелі, що знаходиться праворуч від кнопки, виводиться назва порту «Чорноморськ», як показано на рисунку 5.1.

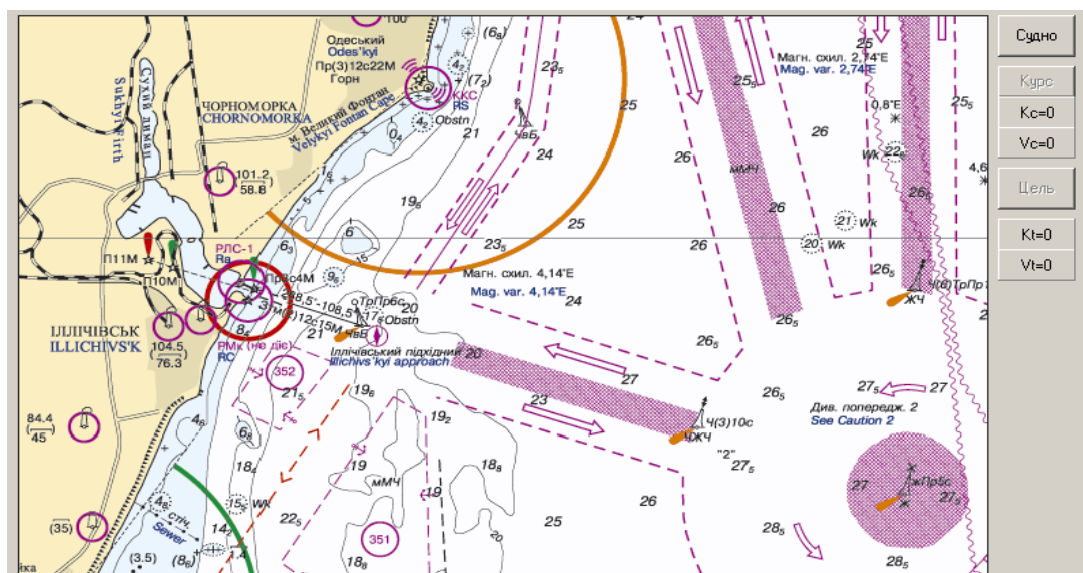


Рисунок 5.1 – Електронна карта підходів до порту Чорноморськ

Для зміни району плавання судна необхідно вибрати іншу електронну карту. Це здійснюється за допомогою лівої нижньої кнопки. Якщо "клікнути" вказану кнопку один раз, то на екран монітора виводиться електронна карта підходів до порту Феодосія, а на нижній лівій кнопці з'являється напис "Карта_2". На інформаційній панелі, що знаходиться праворуч від кнопки, з'являється порт «Феодосія». Зображення на екрані монітора для цієї ситуації показано на рисунку 5.2.

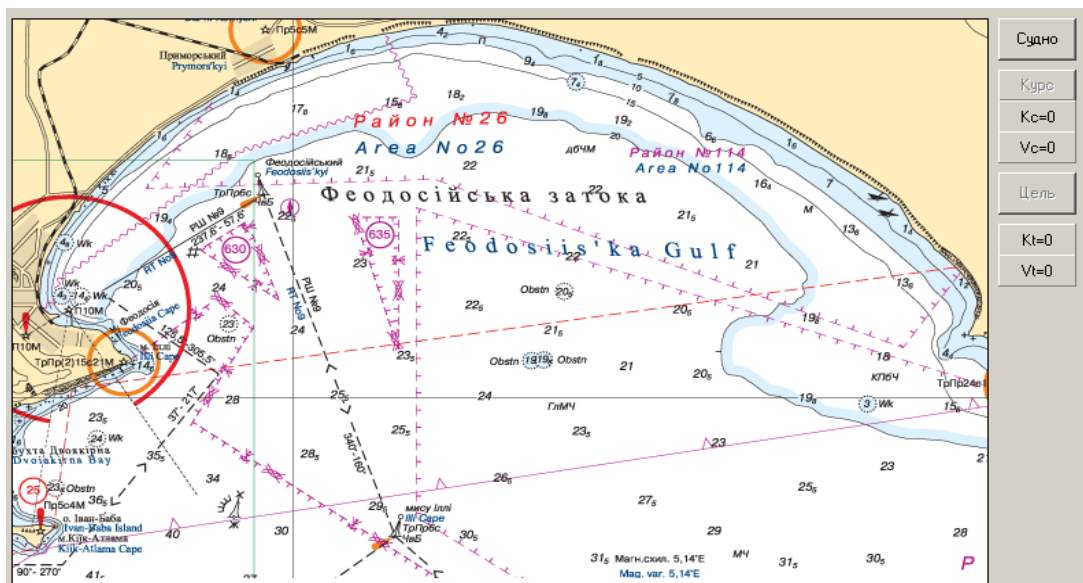
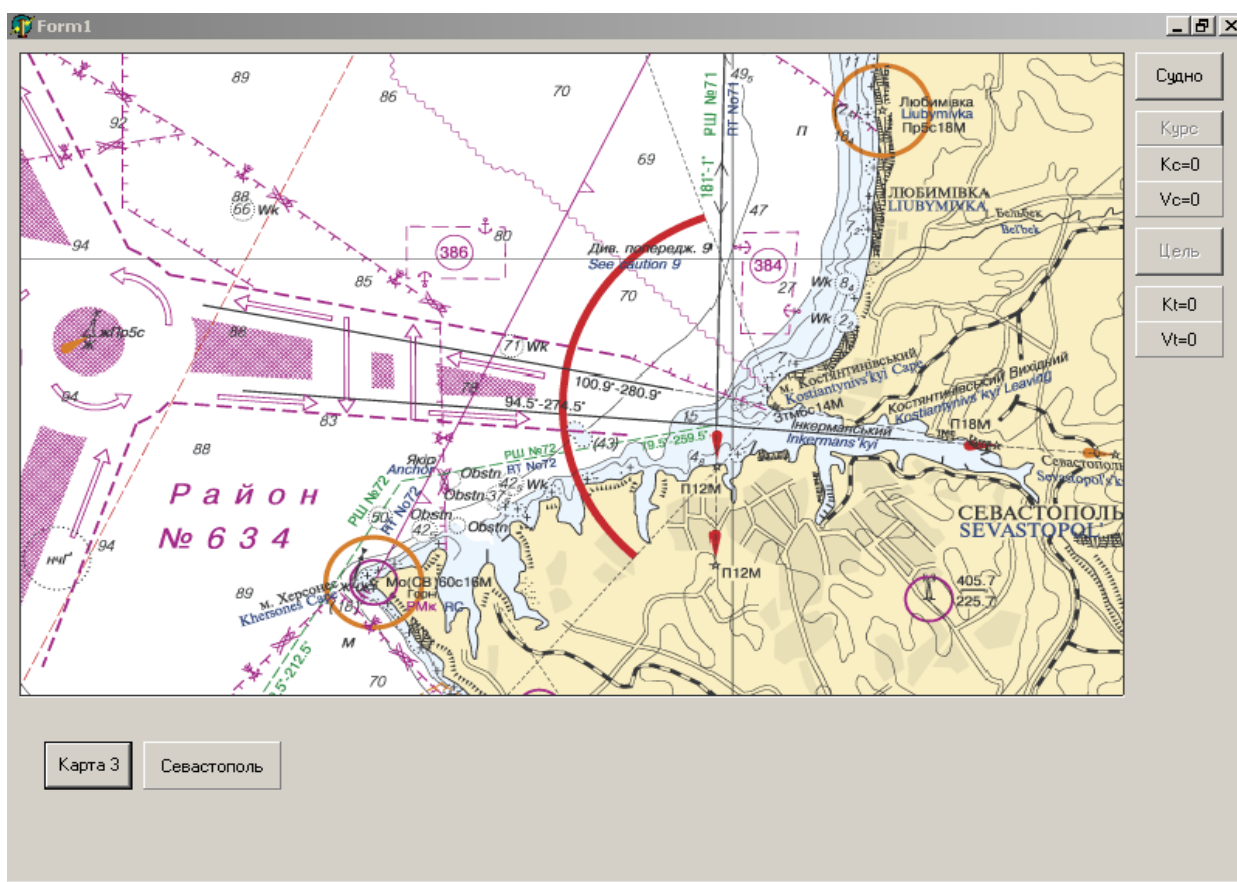


Рисунок 5.2 – Електронна карта підходів до порту Феодосія

Повторне «кликання» лівої нижньої кнопки веде зміну району плавання судна, тобто. завантаження на екран монітора електронної карти підходів до порту Севастополь. Напис на нижній лівій кнопці змінюється на «Карта_3», а на інформаційній панелі з'являється напис «Севастополь». Вигляд екрана монітора для цього випадку показано на Рисунок 5.3. Якщо в черговий раз "клікнути" ліву нижню кнопку, то відбудеться зміна району плавання судна і на екрані монітора з'явиться вихідна електронна карта підходів до порту Чорноморськ.

Як приклад вибираємо електронну карту підходів до порту Чорноморськ. Початкова позиція судна вводиться в такий спосіб. Після вибору електронної карти, що характеризує район плавання судна, слід використовувати клавішу «Судно», що є першою панелі управління, розташованої з правої частини екрана монітора. Після того, як "клікнути" клавіша «Судно», курсор встановлюється на початковому місці судна, вибраному на електронній карті, та натискається права клавіша маніпулятора

«миша». При цьому у вибраній позиції з'являється коло синього кольору із вектором швидкості (рисунк 5.4).



Рисунк 5.3 – Електронна карта підходів до порту Севастополь

У режимі введення курсу активується клавіша «Курс-Швидкість» (на клавіші з'являється напис «Курс»). Для введення курсу судна необхідно використовувати клавішу керування «Курс», після чого з'являються клавіші «>» і «<» введення значення курсу судна. При використанні клавіші «>» значення курсу збільшується на 5° , а при використанні клавіші «<» – зменшується на 5° . Поточне значення курсу судна виводиться відповідну інформаційну панель «Kv= », як показано на рисунку 5.5. На цьому рисунку введено курс судна, що дорівнює 300° .

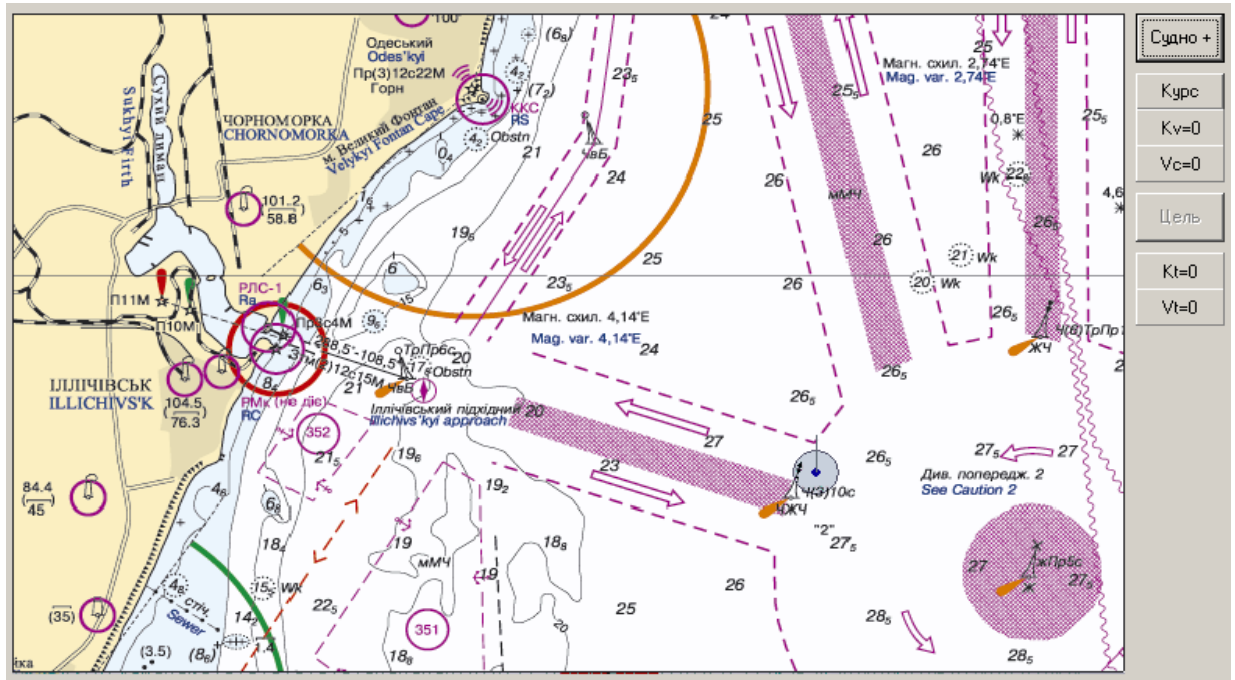


Рисунок 5.4 – Вибір початкової позиції судна

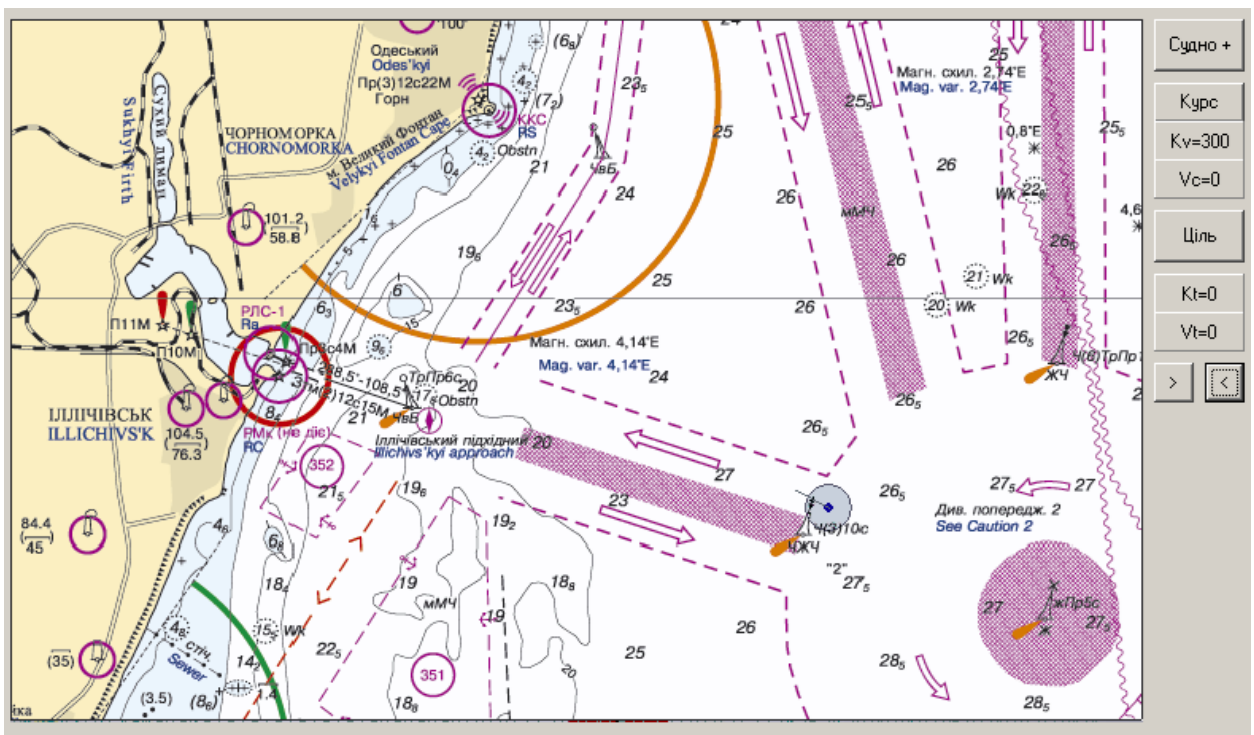


Рисунок 5.5 – Введення курсу судна

При введенні курсу судна змінюється напрямок вектора швидкості, що відповідає курсу судна. Для введення швидкості судна слід «клікнути» на клавішу «Курс-Швидкість», активізуючи режим введення швидкості. При цьому на цій клавіші з'являється напис «Швидкість».

За допомогою керуючих клавіш «>» та «<» проводиться введення значень швидкості судна. Зміна швидкості судна проводиться з кроком один вузол. Максимальне значення швидкості, що вводиться, лімітується величиною 15 вузлів. При зміні величини швидкості судна, що вводиться, змінюється довжина вектора швидкості на електронній карті. Поточне значення швидкості судна виводиться на відповідну інформаційну панель «Vc=» правої сторони монітора, як показано на рисунку 5.6. Причому для показаної малюнку ситуації введена швидкість судна рівна 12 вузлам.

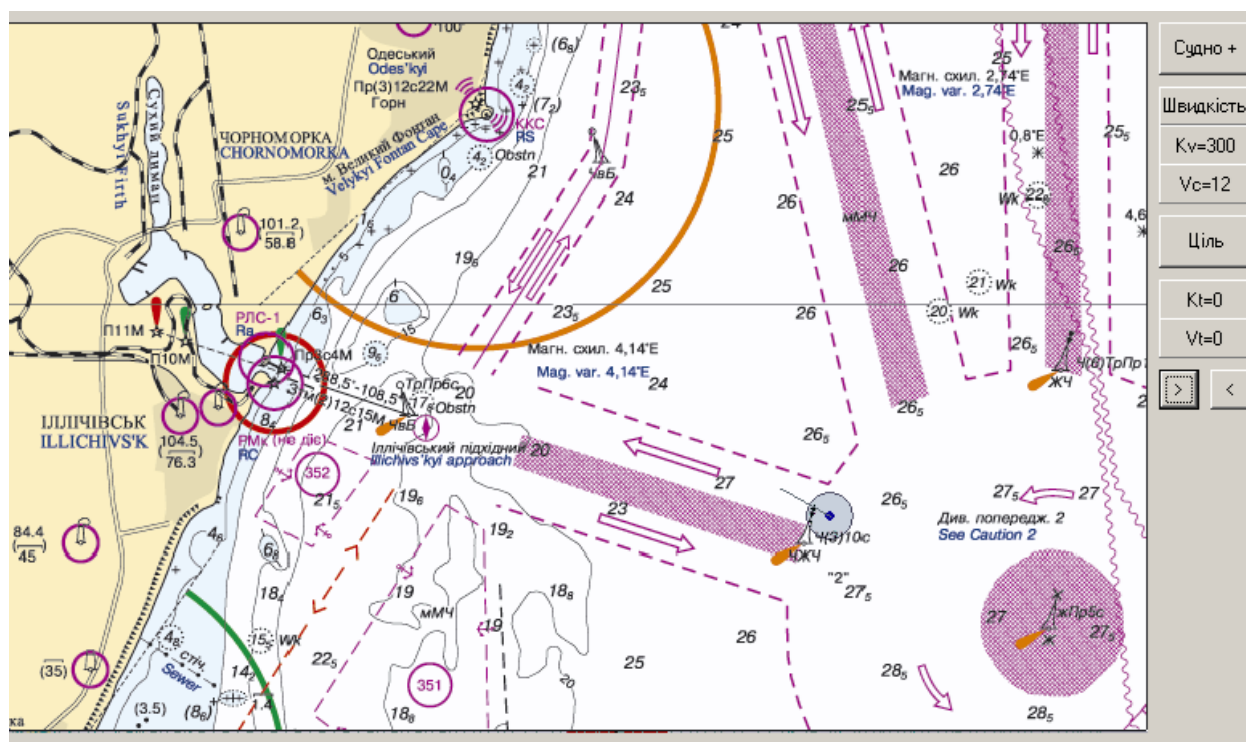


Рисунок 5.6 – Введення швидкості судна

Для коректури значень курсу судна, що вводяться, і його швидкості слід переключити режими введення за допомогою клавіші «Курс-Швидкість». Введення початкової позиції цілі та її параметрів починається з використання клавіші «Ціль», що активізувалася. Після її "кликання" курсор необхідно встановити в початковій позиції цілі на електронній карті, після чого слід натиснути праву клавішу маніпулятора "миша". В результаті в початковій позиції цілі з'являється коло червоного кольору з вектором швидкості орієнтованим на північ (у початковій фазі введення параметрів руху цілі її курс і швидкість дорівнюють нулю), як показано на рисунку 5.7

Введення значень курсу та швидкості цілі проводиться аналогічно до судових параметрів. За допомогою клавіші «Курс-Швидкість» вибирається введений параметр. Його значення задається клавішами «>» і «<», а чисельні значення виводяться на інформаційні панелі «Kt=» і «Vt=», при цьому вектор швидкості цілі орієнтований згідно параметрів, що вводяться. На рисунку 5.8 показана ціль з курсом рівним 190° та швидкістю 14 вузлів. Для корекції параметрів руху судна та цілі слід використовувати клавіші «Судно» та «Ціль».

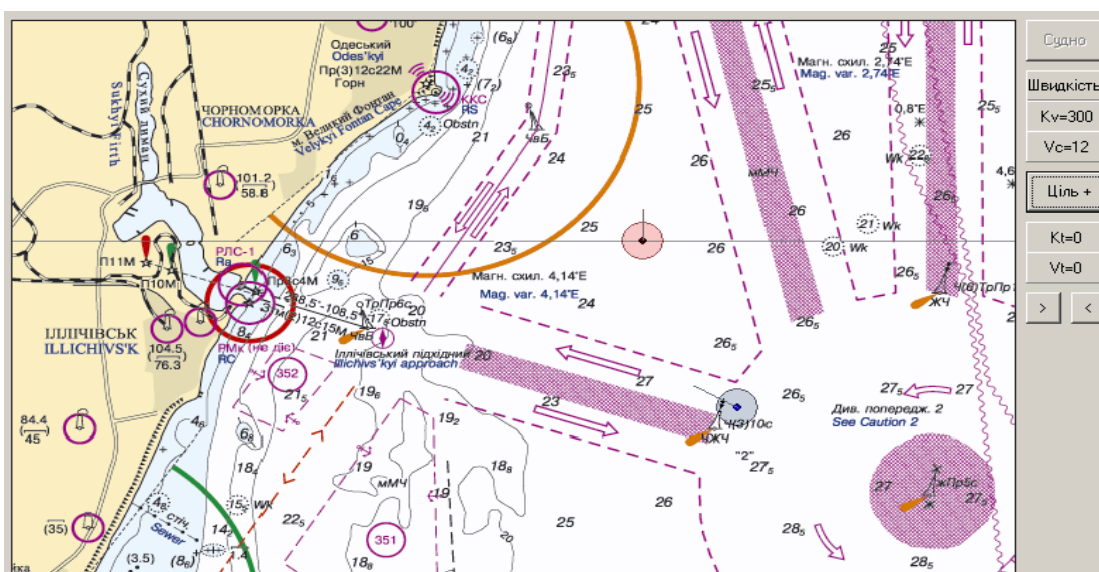


Рисунок 5.7 – Вибір початкової позиції цілі

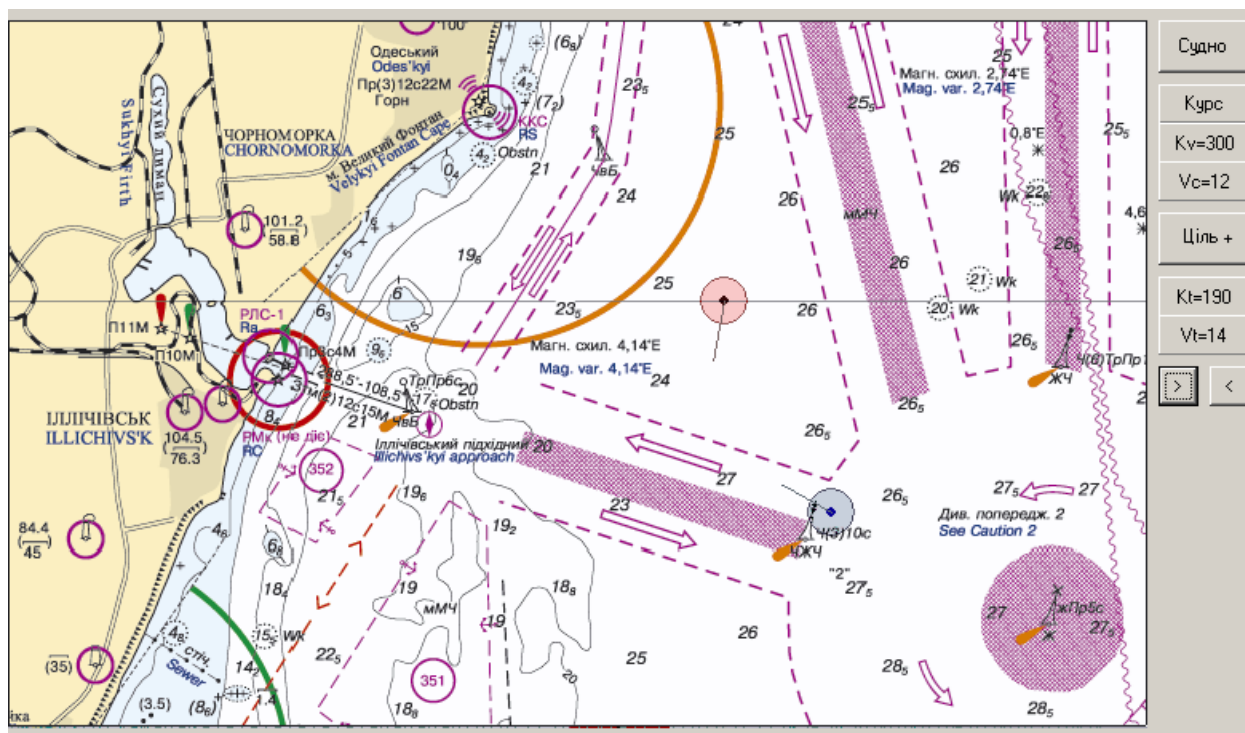


Рисунок 5.8 – Введення параметрів руху цілі

Після введення параметрів руху цілі в нижній частині екрана з'являється клавіша «Орієнтири», що забезпечує вибір довільних орієнтирів (від одного до трьох) для визначення місця судна та індикації поля точності в межах електронної карти. "Клікнувши" клавішу "Орієнтири", необхідно поєднати курсор з вибраним орієнтиром і натиснути ліву клавішу "миші". Вибраний орієнтир відзначається світло-зеленим колом, центр якого збігається з орієнтиром. Якщо число орієнтирів більше, вибір наступних проводиться аналогічно першому: курсор поєднується з орієнтиром і клацається ліва клавіша миші. Максимальна кількість орієнтирів, що вибираються, дорівнює трьом. На рисунку 5.9. показаний варіант вибору трьох орієнтирів.

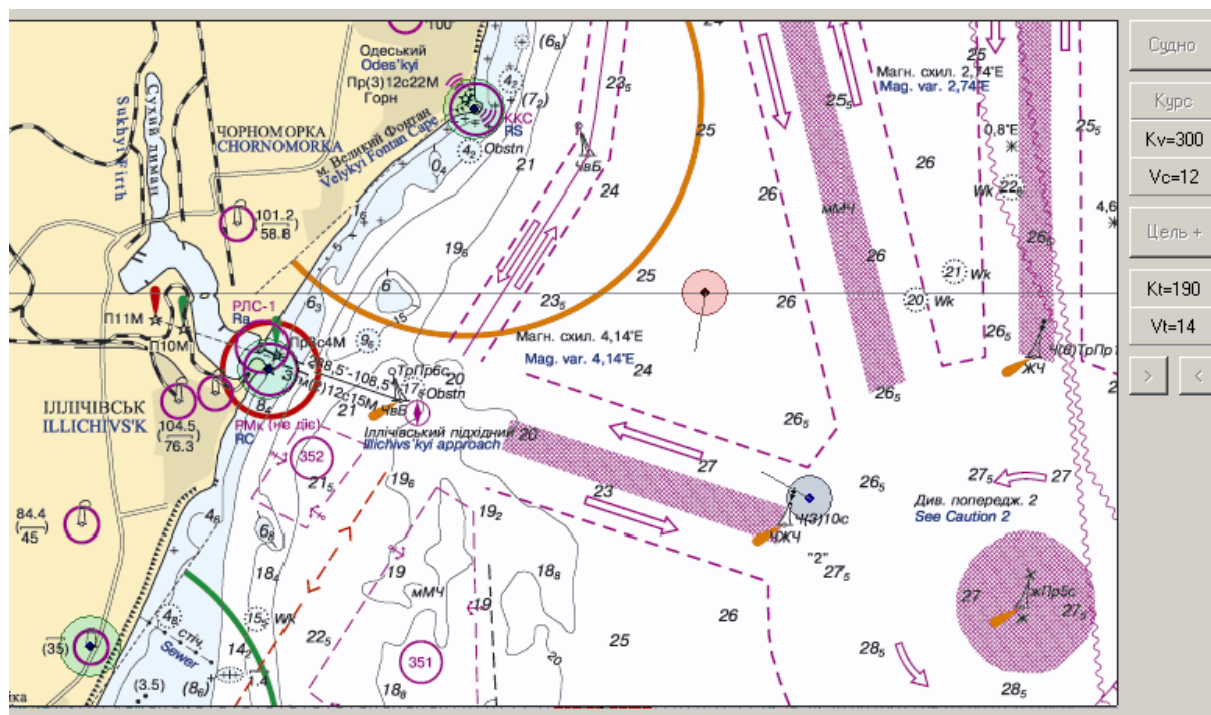


Рисунок 5.9 – Вибір орієнтирів для обсервації судна

При виборі орієнтирів поряд із клавішею «Орієнтири» з'являється панель, на якій вказується кількість вибраних орієнтирів. За допомогою кнопки «Скасувати» можна скасувати вибраний варіант орієнтирів та ввести новий. Відображення поля в режимі кольору без оцифрування здійснюється за допомогою клавіші «Точність». На рисунку 5.10 показано поле точності для трьох вибраних орієнтирів, позначені на електронній карті червоними колами. Як бачимо, найменш точним ділянкою є верхній правий кут електронної карти.

При використанні клавіші «Оцифрування» поле точності відображається на електронній карті з нанесенням 95% кругової похибки в метрах. Якщо значення похибки перевищує 100 м, то оцифрування такої ділянки не провадиться. На рисунку 5.11 наведено поле точності з нанесеними значеннями 95% кругової похибки. Значення похибки у правому верхньому куті перевищує 100 м, тому оцифрування показаного району не проведено.



Рисунок 5.10 – Відображення точного поля без оцифрування

Після відображення поля точності в будь-якому режимі (з оцифровкою або без неї) активізується клавіша «Зіткнення», що дозволяє виявити сектор небезпечних курсів судна, на яких дистанція найкоротшого зближення судна з ціллю менше її гранично-допустимого значення. На рисунку 5.12 показаний такий сектор курсів судна укладений між граничними курсами приблизно 250° та 310° . Сектор забарвлений у червоний колір змінної інтенсивності, – чим більша дистанція найкоротшого зближення, то світліший червоний колір. Поруч із клавішею «Зіткнення» з'являються два інформаційних табло, у яких вказується дистанція найкоротшого зближення « $D_{mn}=\rangle$ » та час найкоротшого зближення « $T_{mn}=\rangle$ ».

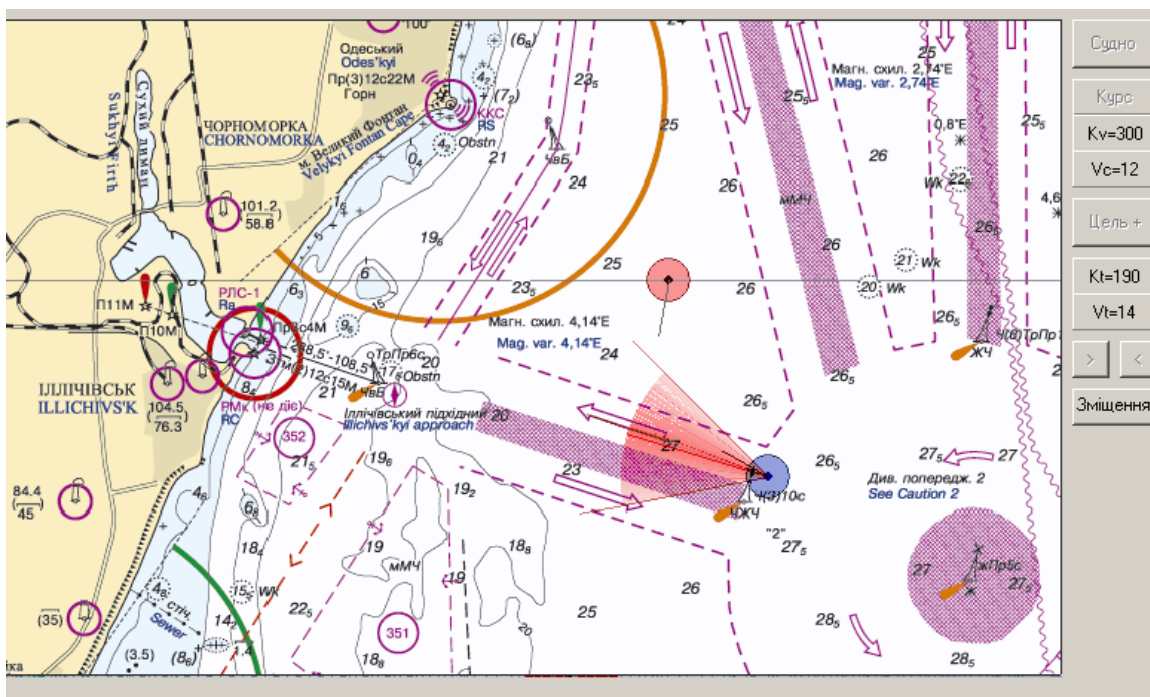


Рисунок 5.12 – Формування сектора небезпечних курсів судна

Для даного випадку дистанція і час найкоротшого зближення дорівнюють відповідно 0,42 милі і 13,8 хвилини. Після завершення формування сектора небезпечних курсів судна у правій панелі управління з'являється активізована клавіша «Зміщення», за допомогою якої визначається ширина лінійного зміщення судна, що виникає внаслідок маневрування судна. В результаті "кликання" по клавіші "Зміщення" активізуються керуючі клавіші «ГК тип 1(2)» та «dK=» (рисунок 5.13).

Кнопками «ГК тип 1(2)» вибирається тип встановленого на судні гірокомпаса. "Кликання" по клавіші "ГК тип 1(2)" веде до зміни одного типу гірокомпаса на інший. Під першим типом мається на увазі гірокомпас із твердим маятником, а під другим – коригований гірокомпас із непрямим управлінням. За допомогою клавіші «dK=» здійснюється введення зміни курсу судна в результаті маневру, кожне «клікання» по клавіші збільшує величину зміни курсу на 5°. Після першого використання клавіші « dK= » з'являються керуючі клавіші « < > » та « << >> » для відображення лінії ліній-

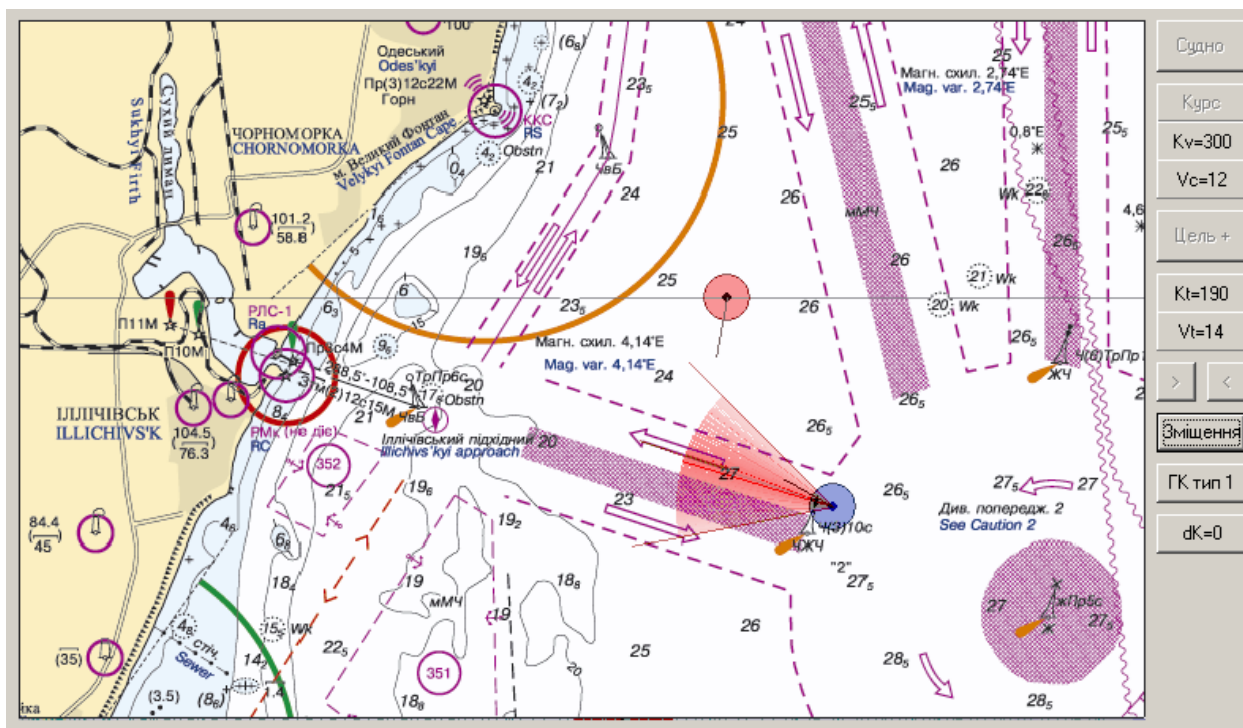


Рисунок 5.13 – Використання клавіші Зміщення

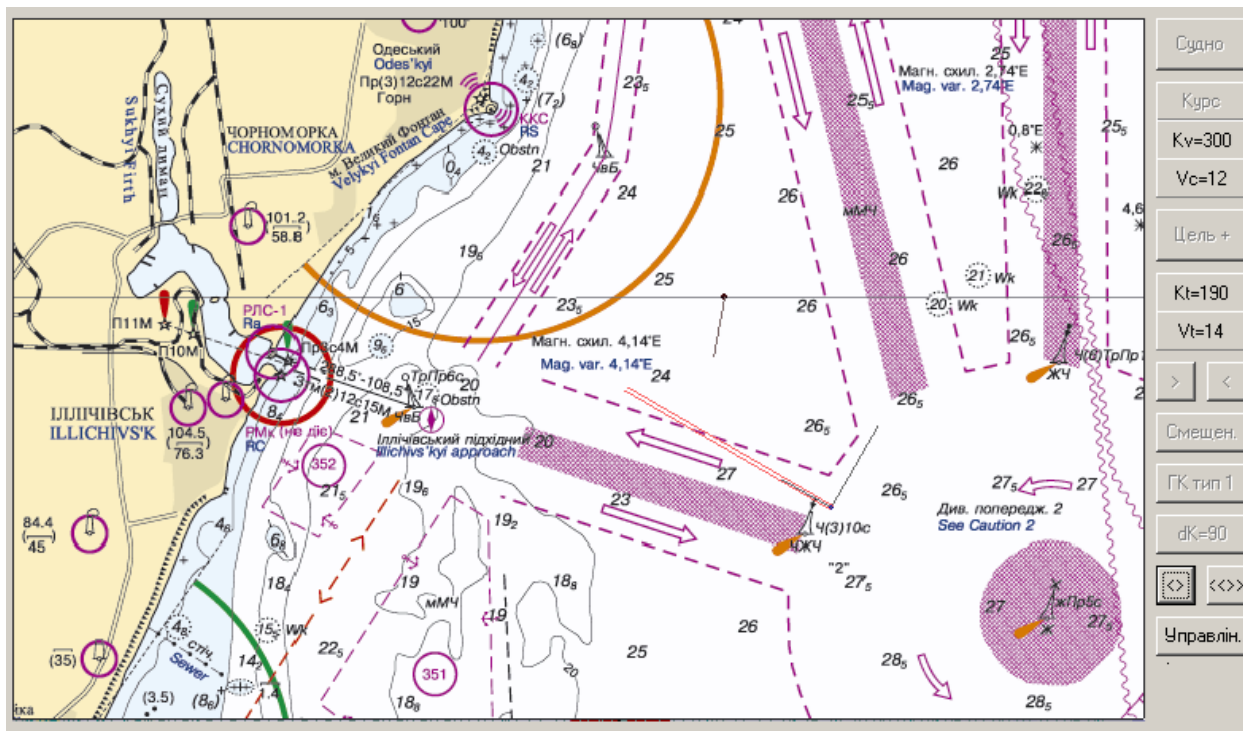


Рисунок 5.14 – Відображення смуги лінійного усунення судна

ного зміщення. При використанні клавіші «< >» з початкової позиції судна наносяться межі смуги, забарвлені у червоний колір (рисунок 5.14).

При цьому початкові позиції судна та цілі позначені точками відповідно синього та червоного кольору. Якщо використовується клавіша «<< >>», то відображається у збільшеному вигляді ділянка електронної картки в районі знаходження судна. Вихідна ділянка електронної карти, яка збільшується, забарвлюється блакитним фоновим кольором (рисунок 5.15). Збільшена ділянка виводиться на жовтому фоні, показано смугу лінійного усунення симетрично щодо позиції судна. На збільшеній ділянці електронної карти щодо початкової позиції судна побудовано його безпечну зону, яка враховує інерційні характеристики. Формою судової безпечної зони обрано еліпс зі зміщеним центром, що збігається з центром мас судна.

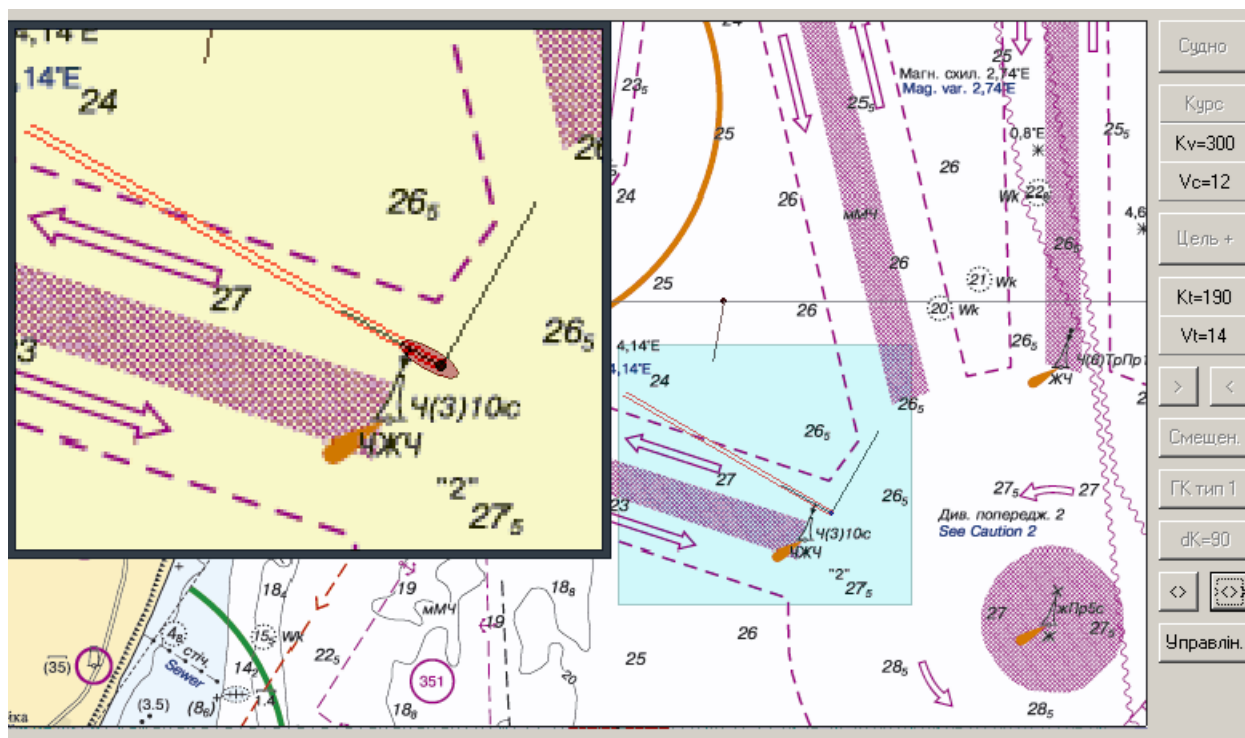


Рисунок 5.15 – Виведення збільшеної ділянки електронної картки

Під час використання клавіш «<>» або «<< >>» з'являється активована клавіша «Керування», за допомогою якої можна вибрати безпечний курс руху судна. Після використання цієї клавіші на електронну карту наноситься оцифроване поле точності, сектор небезпечних курсів судна, як показано на рисунку 5.16.

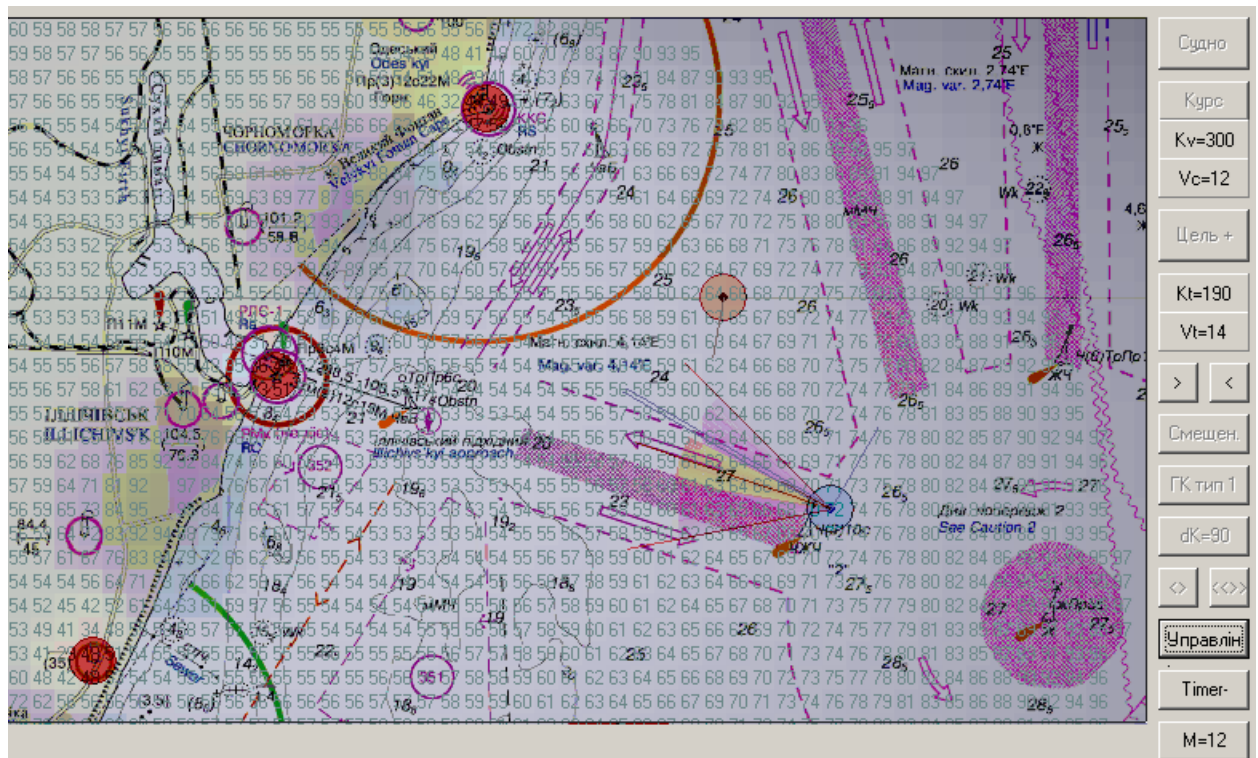


Рисунок 5.16 – Використання клавіші «Управлін.»

Після використання клавіші «Керування». на правій панелі з'являються клавіші «Timer» і «M=», а також активуються клавіші «>» і «<» для вибору безпечного курсу судна.

При використанні клавіш «>» і «<» змінюється не тільки напрямок передбачуваного руху судна, а також меж смуги усунення судна (забарвлених жовтим кольором), як показано на рисунку 5.17.

На вказаному рисунку вибрано граничний безпечний курс поворотом праворуч на 345°, що показано на інформаційній панелі. У цьому випадку

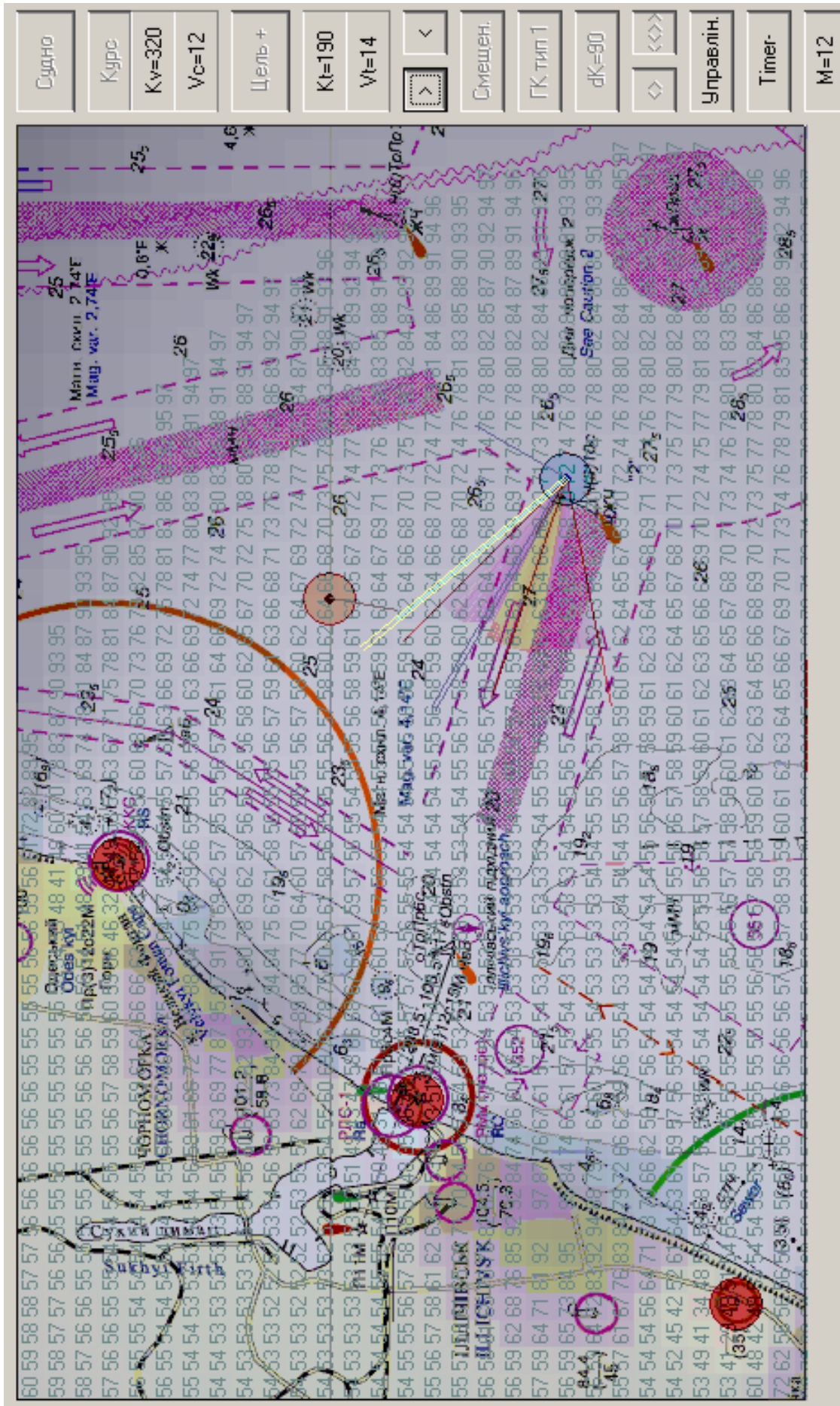


Рисунок 5.17 – Вибір безпечної траєкторії руху судна

траєкторія судна проходить по ділянці поля точності з хорошими характеристиками та безпечно щодо цілі.

Для перевірки коректності вибору безпечного курсу судна є можливість програти ситуацію переміщення судна та цілі з вибраними параметрами руху. Програвання маневру здійснюється за допомогою клавіші «Timer», яка при першому «кликанні» запускає таймер, і моделюється переміщення судна та цілі із заданими параметрами. Чергове "клікання" по клавіші "Timer" вимикає таймер, і процес програвання завершується. Повторні "кликання" по клавіші "Timer" запускають або зупиняють таймер. На рисунку 5.18 показаний результат використання клавіші "Timer". На електронну карту виводиться оцифроване поле точності без застосування кольору.

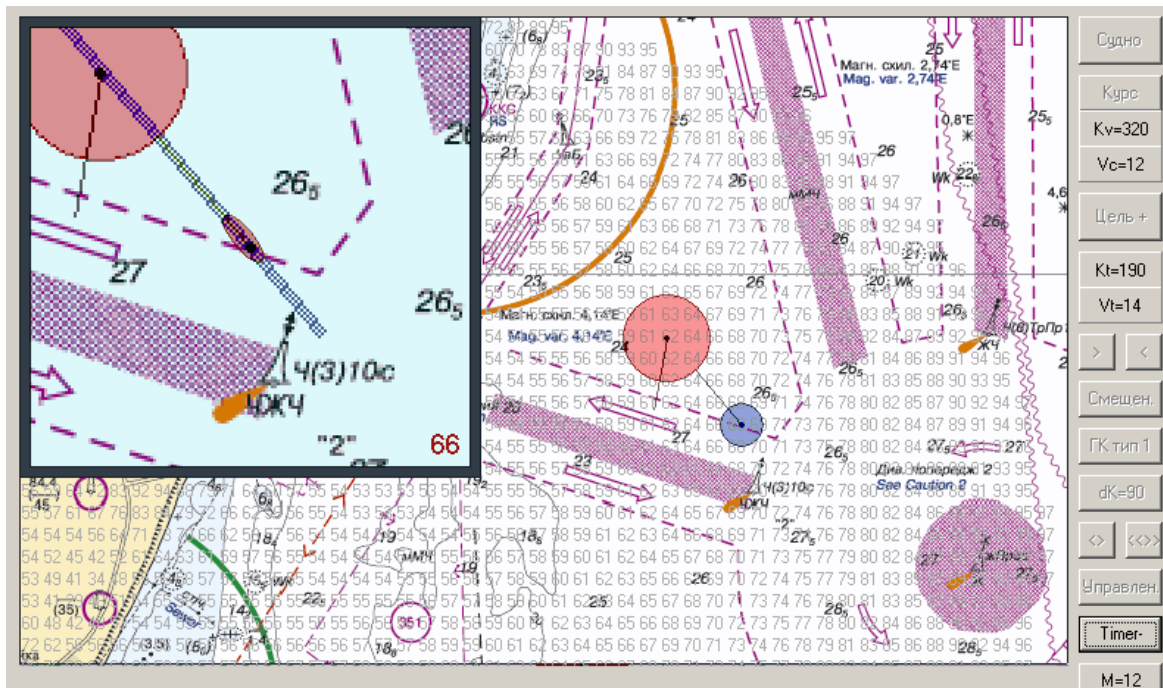


Рисунок 5.18 – Використання клавіші «Timer»

Щодо цілі відображається коло червоного кольору, радіус якого дорівнює гранично допустимій дистанції найкоротшого зближення. Ділянка електронної карти, що містить судно, відображається у збільшеному розмірі,

причому без нанесення оцифрування поля точності. У лівому нижньому кутку збільшеної ділянки електронної карти червоним кольором виводиться значення 95% кругової похибки точки, де знаходиться судно. На рисунку 5.19 ця похибка дорівнює 56 м. На збільшеній ділянці електронної карти навколо судна будується безпечна зона у вигляді еліпса зі зміщеним центром.

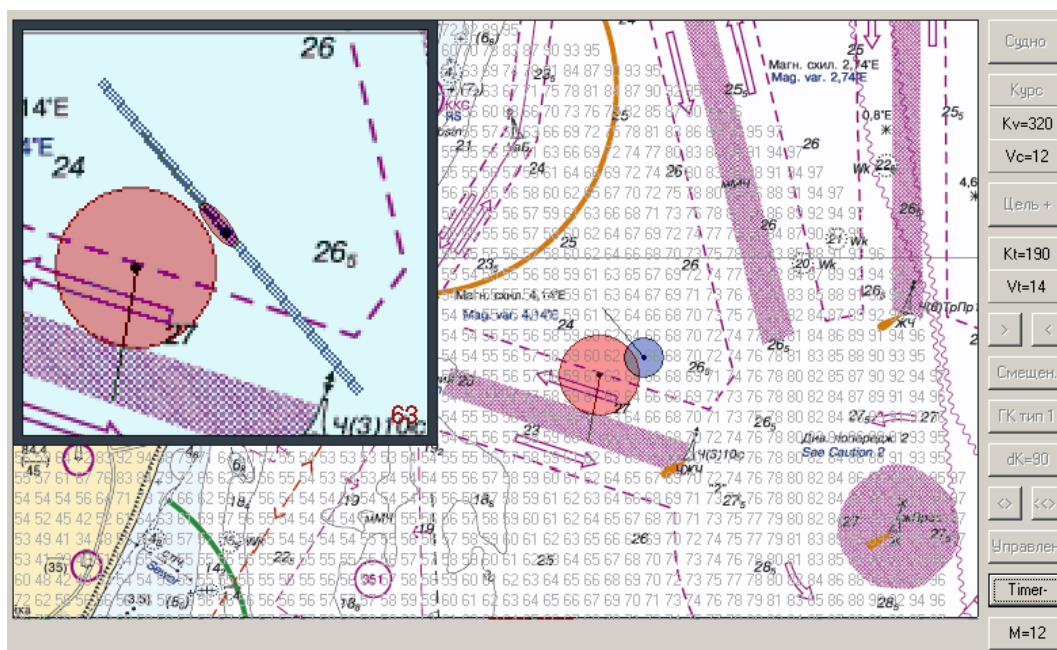


Рисунок 5.19 – Відображення збільшеної ділянки електронної карти

За допомогою збільшеної ділянки електронної карти можна візуально оцінити співвідношення дистанції найкоротшого зближення із гранично-допустимою дистанцією найкоротшого зближення. Так, на рисунку 5.18 та рисунку 5.19 дистанція найкоротшого зближення дорівнює її гранично-допустимому значенню, що свідчить про правильний вибір безпечного курсу судна. За допомогою кнопки «Початок» здійснюється введення нової навігаційної ситуації.

5.3. Відображення навігаційної ситуації на електронній карті підходів до порту Феодосія

Розглянемо відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі при використанні електронної карти підходів до порту Феодосії. Спочатку, скориставшись клавішами "Судно", "Ціль" та "Курс-Швидкість", вибираються початкові позиції судна і цілі та вводяться їх параметри руху, як показано на рисунку 5.20. В даному прикладі введені параметри $K_v=260^\circ$, $V_v=15$ вузлів, $K_t=105^\circ$ і $V_t=14$ вузлів.

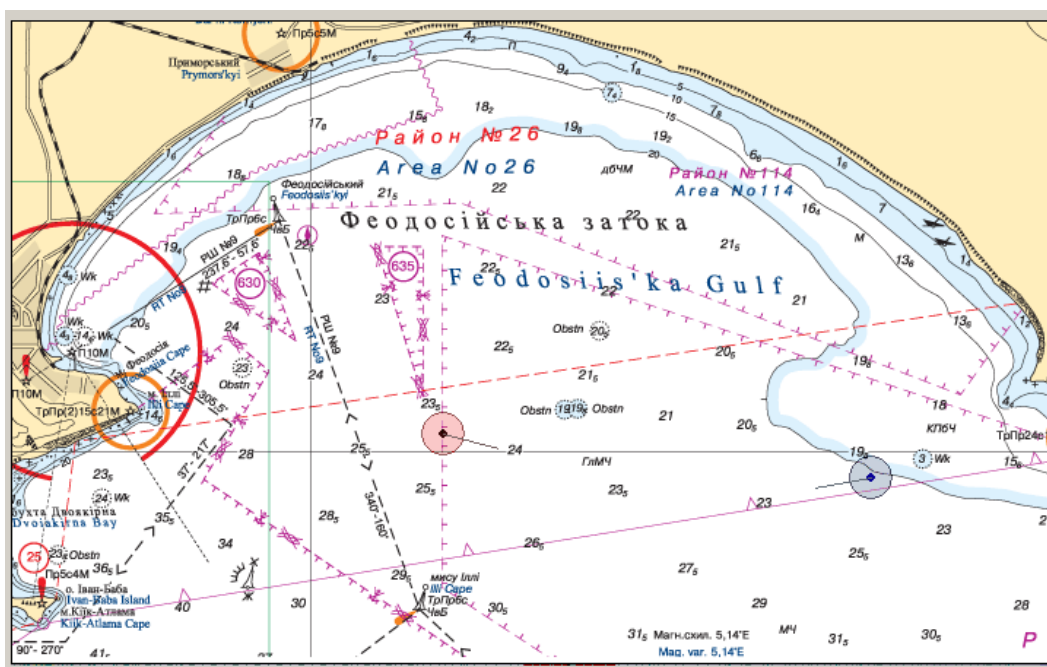


Рисунок 5.20 – Позиція судна і цілі

Для формування поля точності вибрано три орієнтири, як показано на рисунку 5.21. Орієнтири позначені колами зеленого кольору.

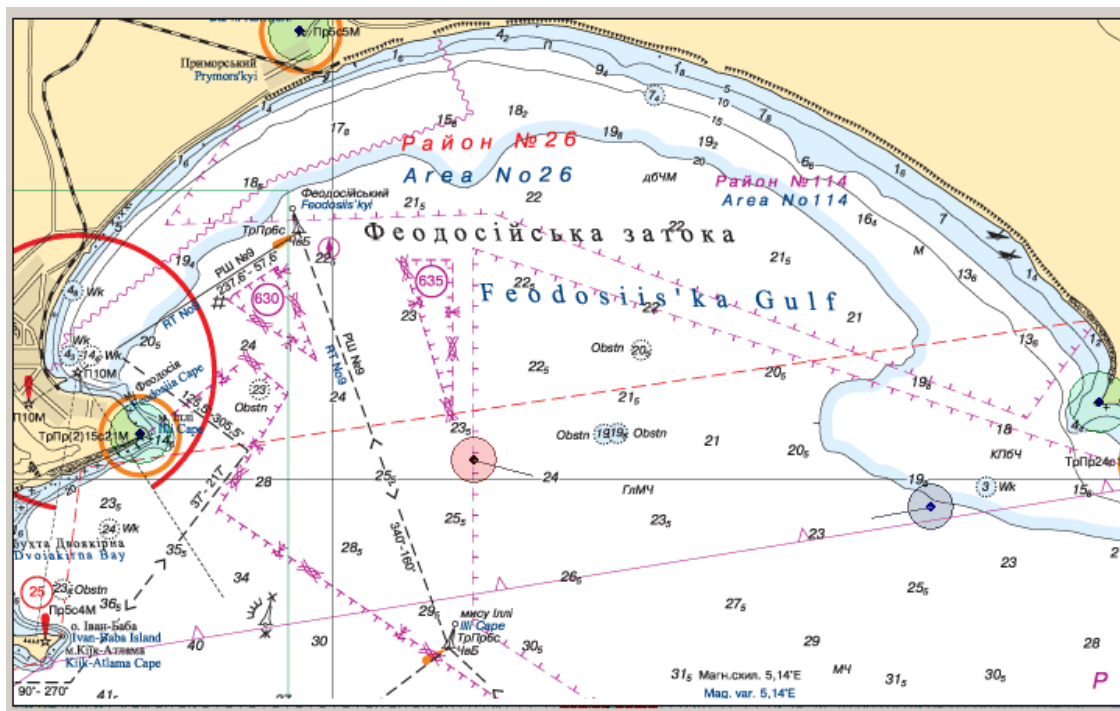


Рисунок 5.21 – Вибір орієнтирів для обсервації

Поле точності, яке створюється вибраними орієнтирами, без оцифрування відображено на рисунку 5.22.

Оцифроване поле точності показане на рисунку 5.23.

Так як ціль та судно зближаються, інформаційною системою проводиться аналіз можливості зіткнення і розраховано величину дистанції найкоротшого зближення, яка складає 0,65 милі, і менша допустимої дистанції зближення, тобто 1 милі. Тому зближення небезпечне і розраховано сектор недопустимих курсів ухилення, що відображено на рисунку 5.24.

Для виходу на завданий курс судно здійснило поворот, тому виникає його бічне зміщення відносно прямолінійної траєкторії руху, тому системою визначається смуга бічного зміщення, яка показана на рисунку 5.25 і її збільшене відображення (рисунок 5.26).

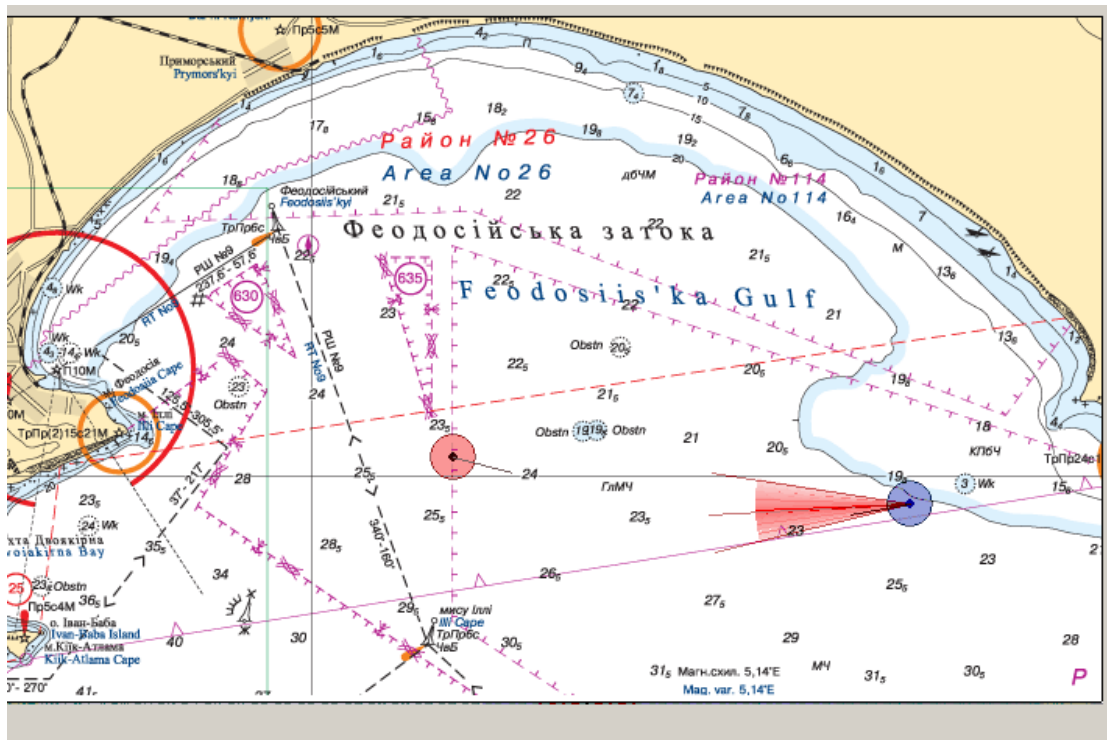


Рисунок 5.24 – Сектор недопустимих курсів ухилення

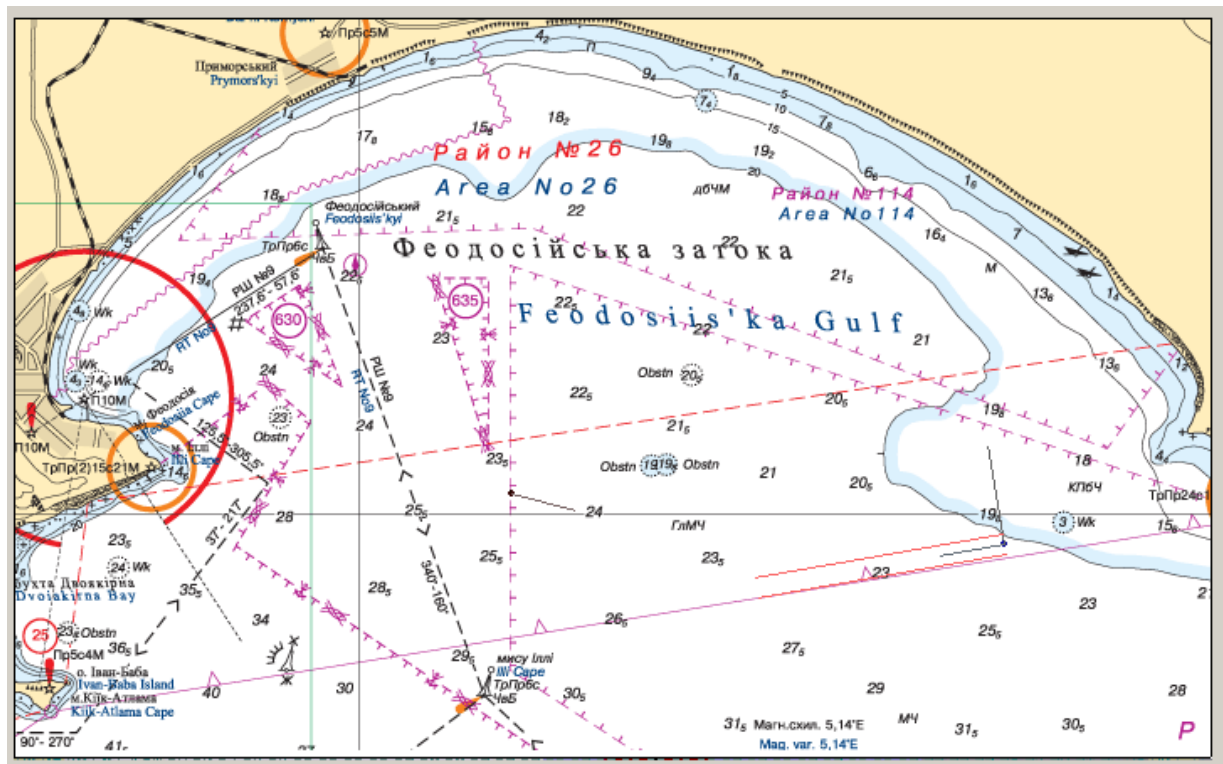


Рисунок 5.25 – Смуга бічного зміщення

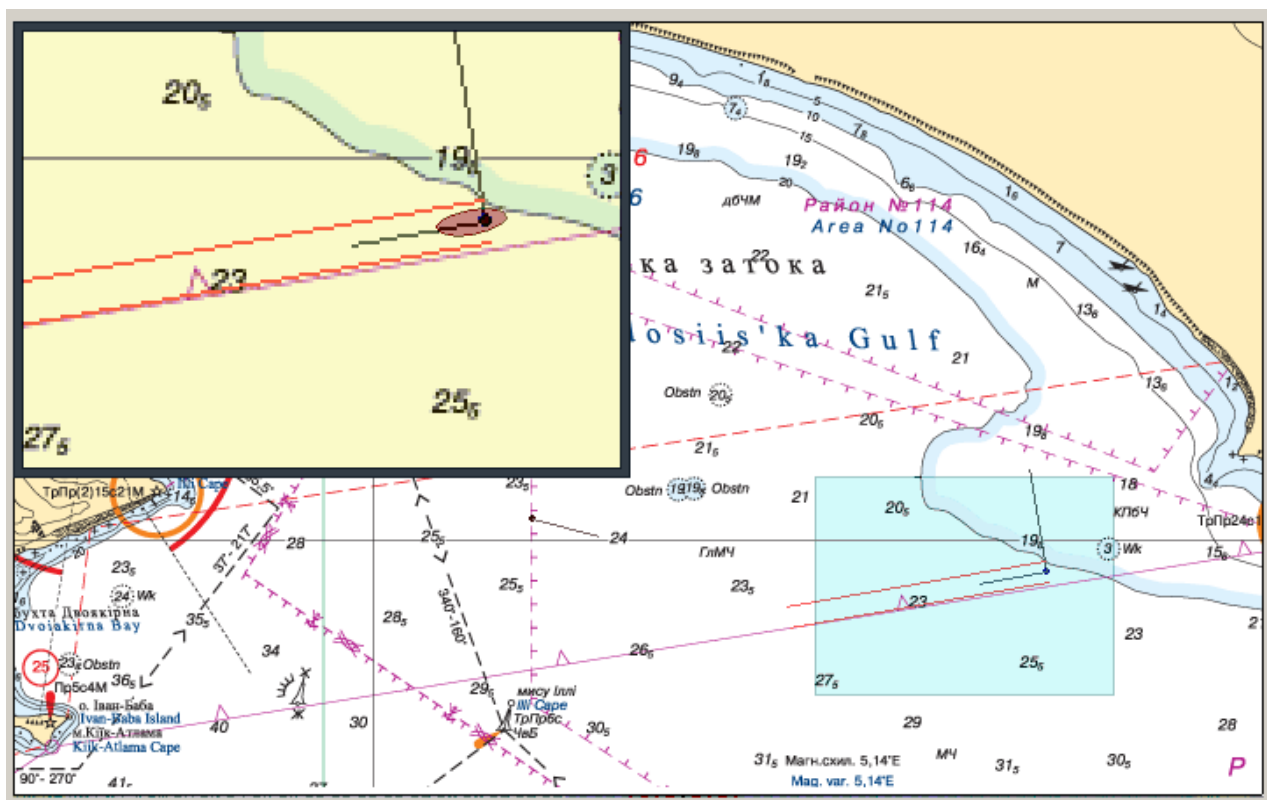


Рисунок 5.26 – Збільшене відображення смуги бічного зміщення

Комплексне відображення навігаційної ситуації, яке враховує вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій, представлено на рисунку 5.27.

Так як зближення суден небезпечне, то потрібна зміна напрямку руху судна на курс ухилення 230° , як показано на рисунку 5.28. При цьому змінюється напрямок смуги бокового зміщення судна.

Програвання маневру ухилення судна від небезпечної цілі відбувається при використанні клавіші «Timer», що показано на рисунку 5.29.

На рисунку 5.30 показана ситуація найкоротшого зближення судна з цілю, причому дистанція між ними більша допустимої дистанції зближення, тобто розходження безпечне.

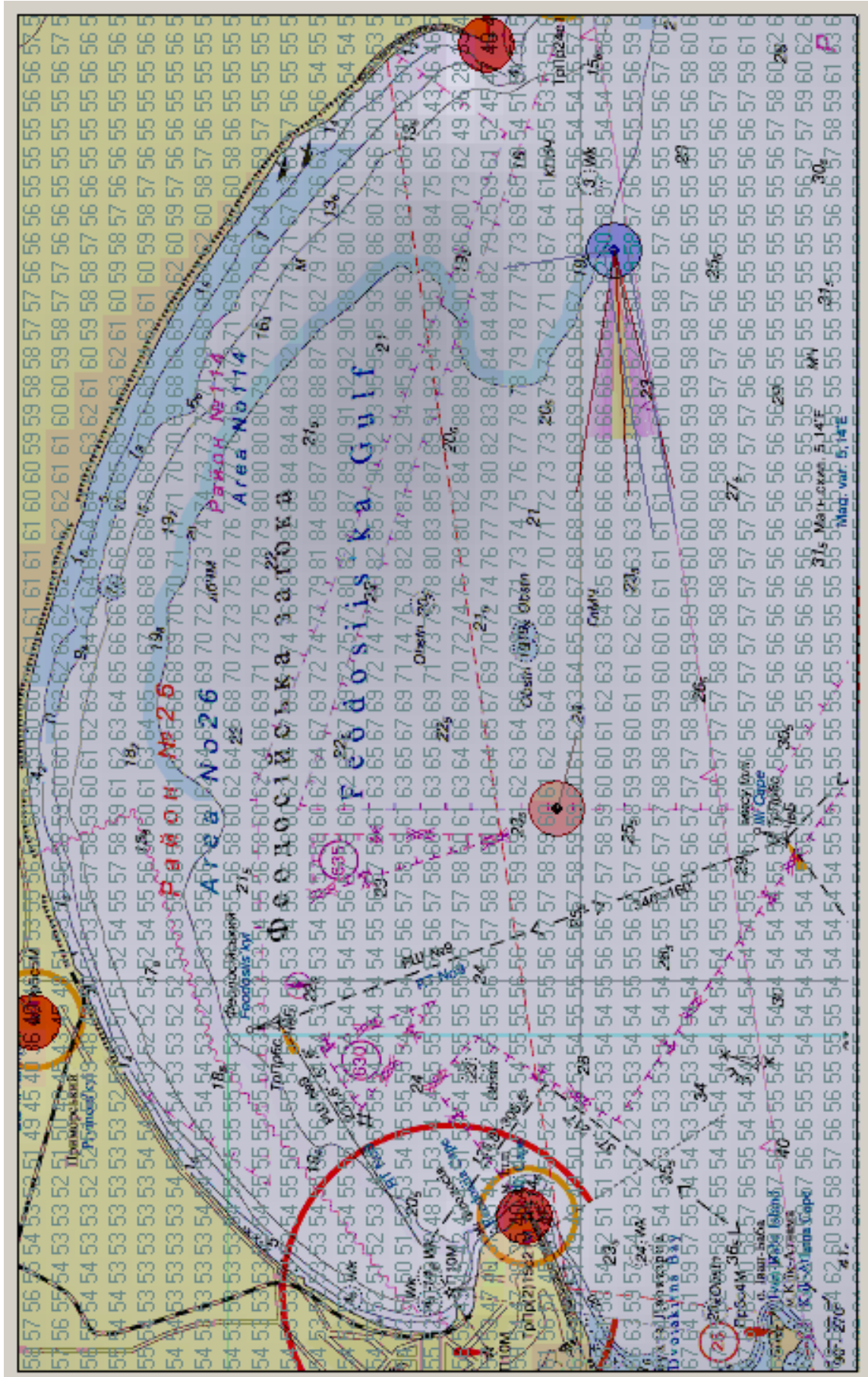


Рисунок 5.27 – Комплексне відображення навігаційної ситуації

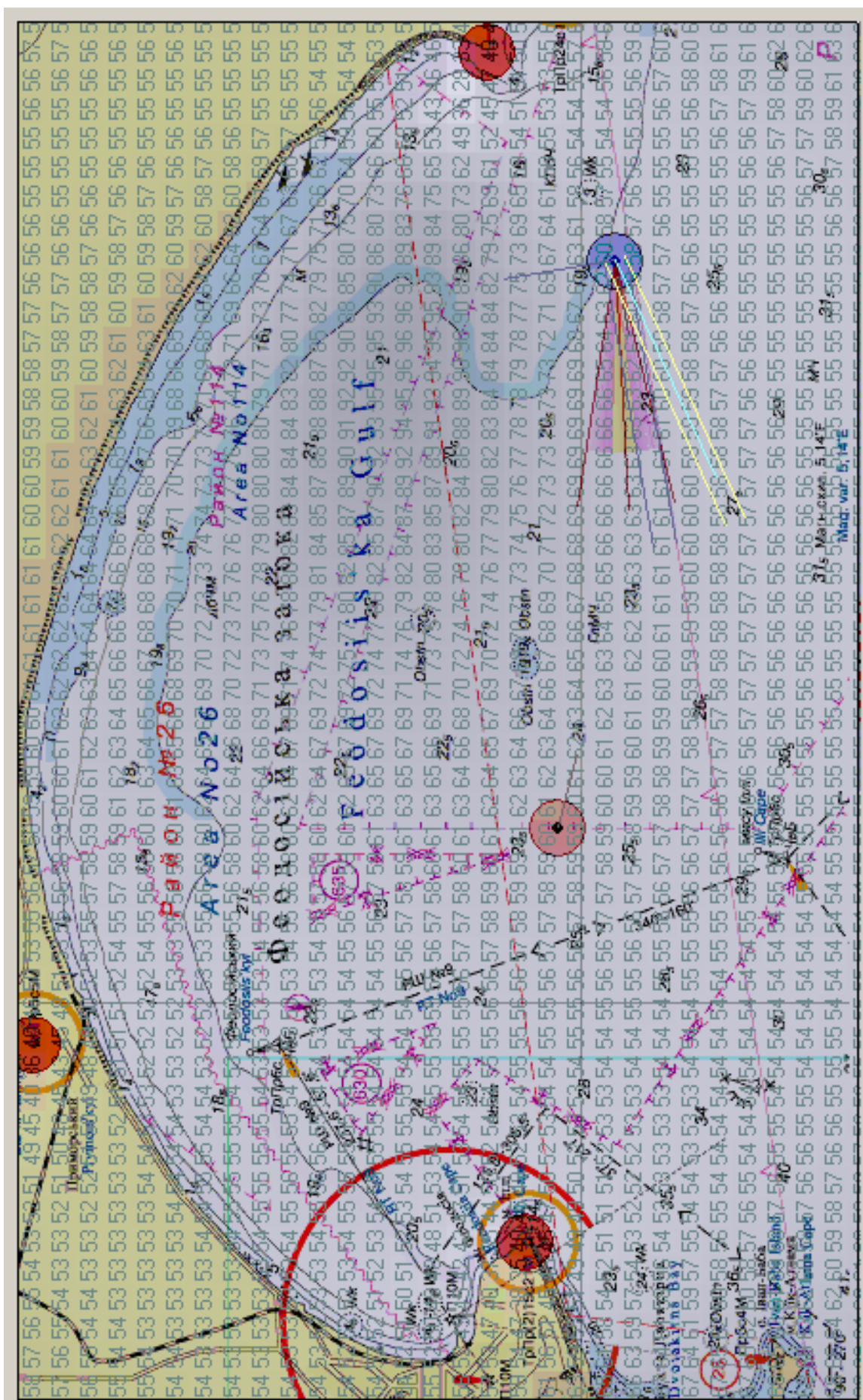


Рисунок 5.28 – Вибір безпечного курсу ухилення

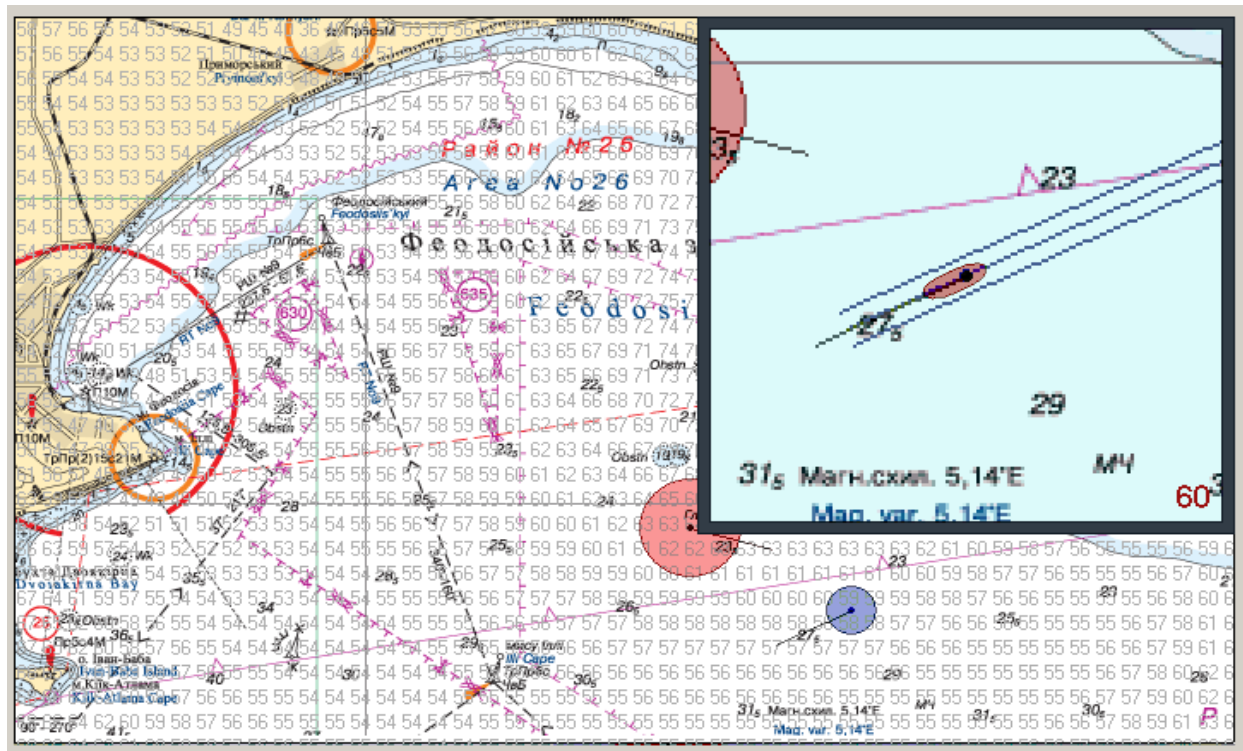


Рисунок 5.29 – Програвання маневру ухилення судна

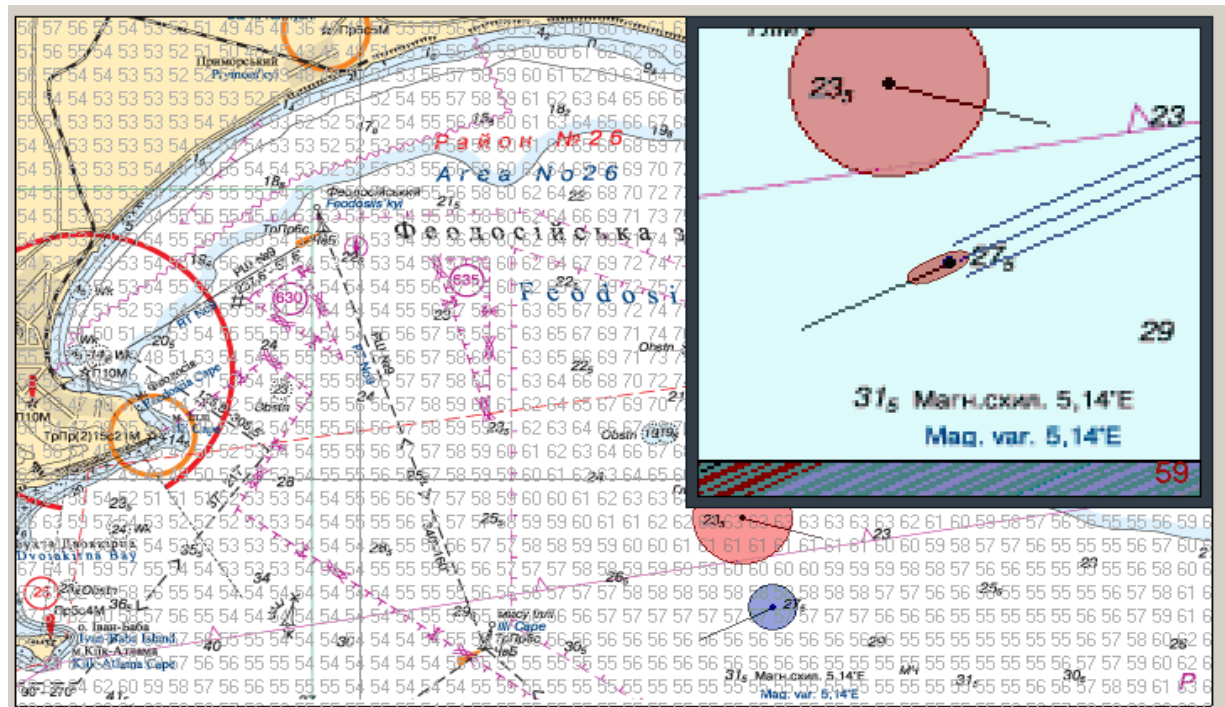


Рисунок 5.30 – Ситуація найкоротшого зближення

5.4. Відображення навігаційної ситуації на електронній карті підходів до порту Севастополь

Використовуючи електронну карту підходів до порту Севастополь, розглянемо відображення навігаційної ситуації в судновій інформаційній системі. За допомогою клавіш "Судно", "Ціль" та "Курс-Швидкість" вибираються початкові позиції судна і цілі та їх параметри руху, що відображено на рисунку 5.31. В цьому прикладі вибрані такі параметри руху $K_v=90^\circ$, $V_v=12$ вузлів, $K_t=15^\circ$ і $V_t=13$ вузлів.

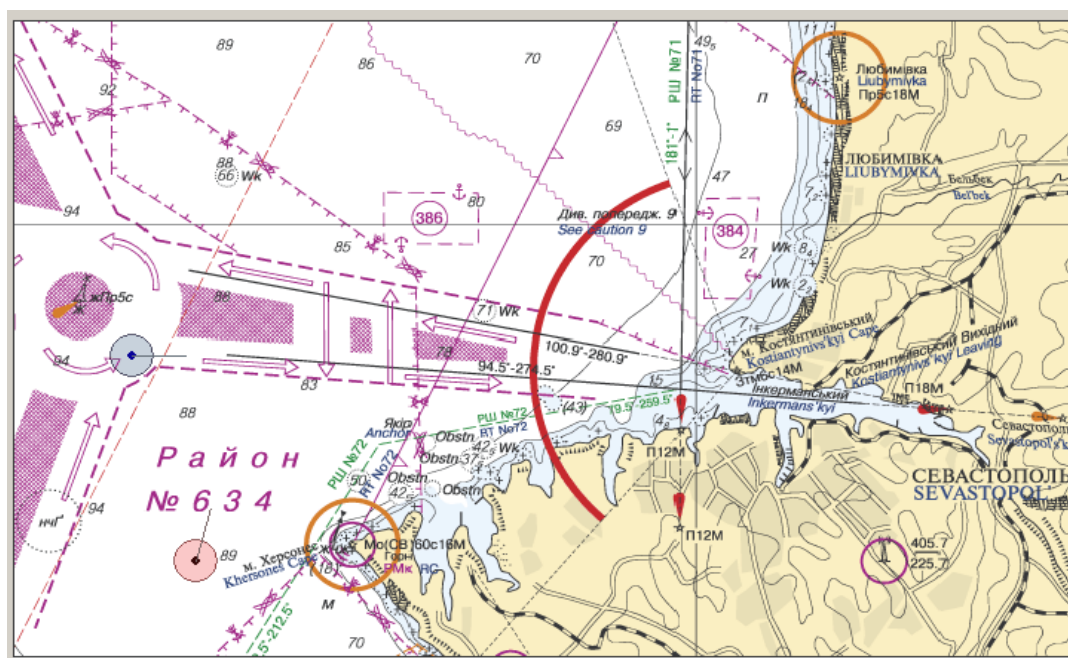


Рисунок 5.31 – Початкові позиції судна і цілі та їх параметри руху

Як показано на рисунку 5.32, для формування поля точності вибрано три орієнтири, які показані колами зеленого кольору.

На рисунку 5.33 відображено поле точності, яке породжено вибраними орієнтирами.

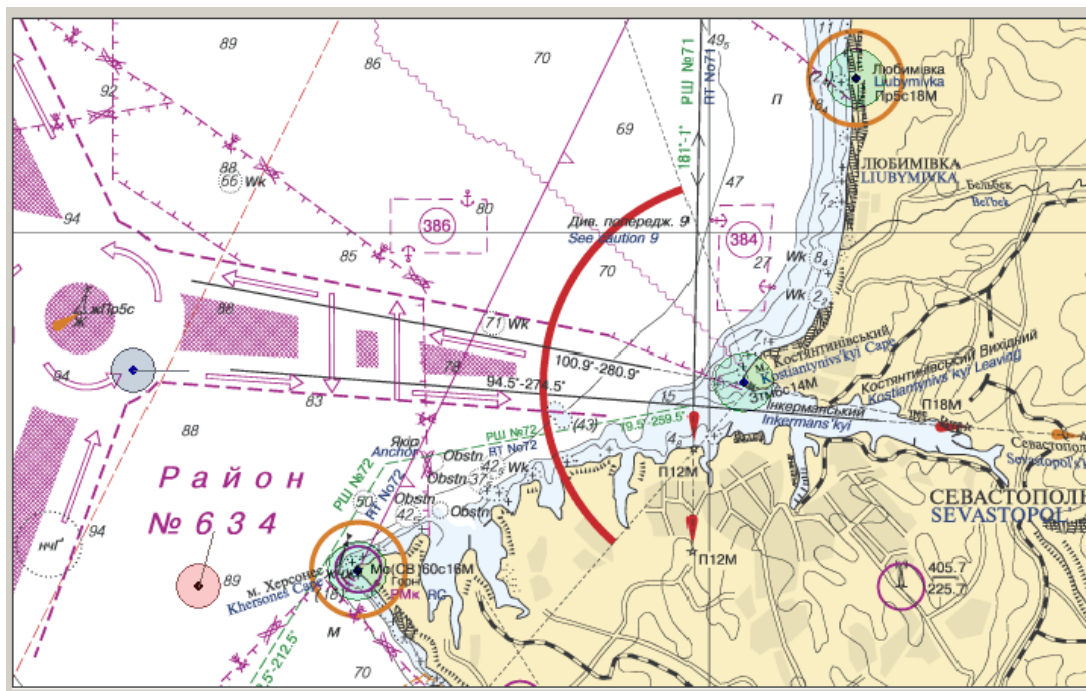


Рисунок 5.32 – Орієнтири, вибрані для обсервації

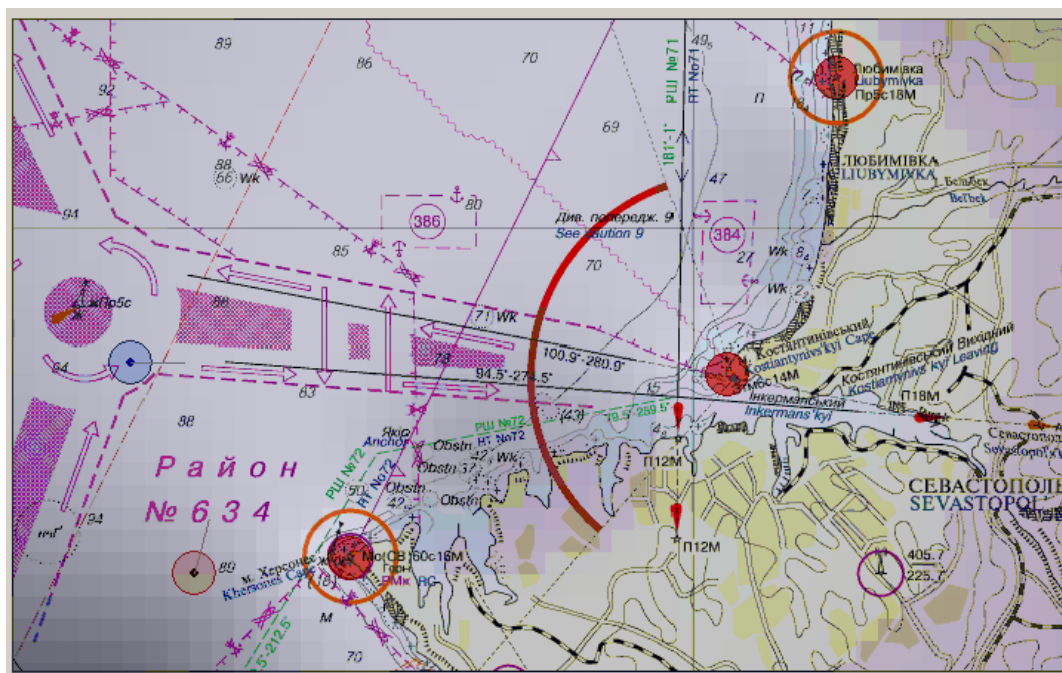


Рисунок 5.33 – Відображення поля точності орієнтирів

Поле точності з оцифруванням відображено на рисунку 5.34.

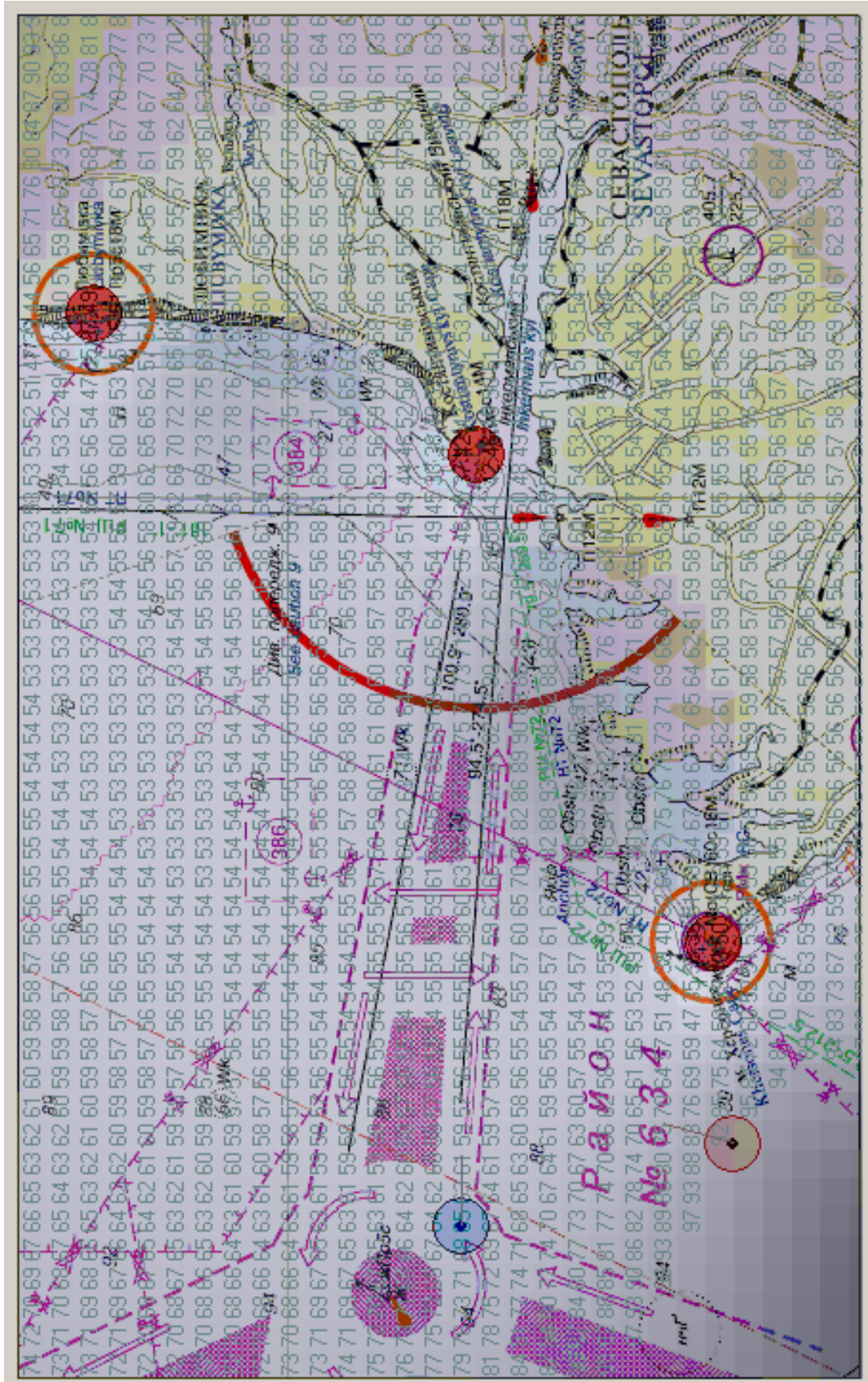


Рисунок 5.34 – Поле точності з оцифруванням

Так як ціль та судно зближаються, інформаційною системою проводиться аналіз можливості зіткнення і розраховано величину дистанції найкоротшого зближення, яка складає 1,50 милі, і більша допустимої дистанції зближення, тобто 1 милі. Тому зближення безпечне і розраховано сектор недопустимих курсів ухилення, що відображено на рисунку 5.35.

Судно здійснило поворот для виходу на завданий курс, через що з'являється його бічне зміщення, тому смуга бічного зміщення показана на рисунку 5.36 і її збільшене відображення (рисунок 5.37).

Комплексне відображення навігаційної ситуації, яке враховує вплив суттєвих ризиків навігаційних аварій, представлено на рисунку 5.38.

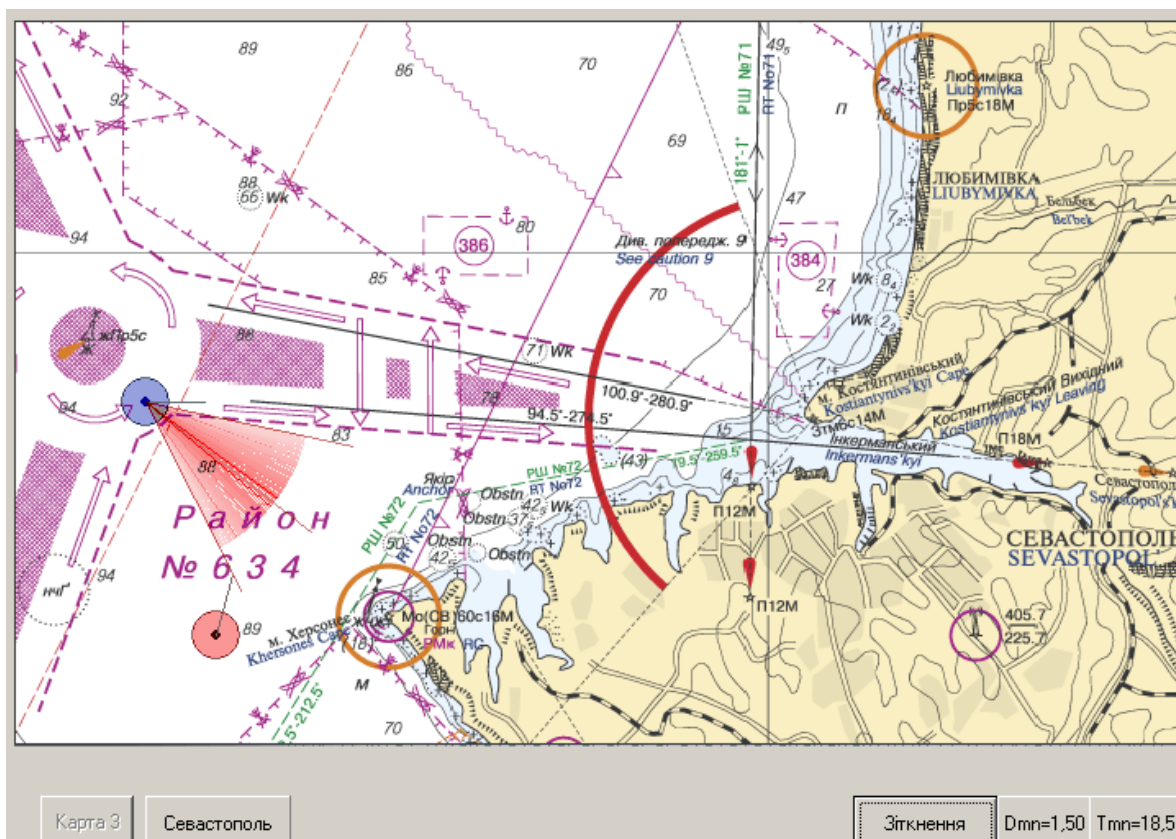


Рисунок 5.35 – Сектор недопустимих курсів ухилення

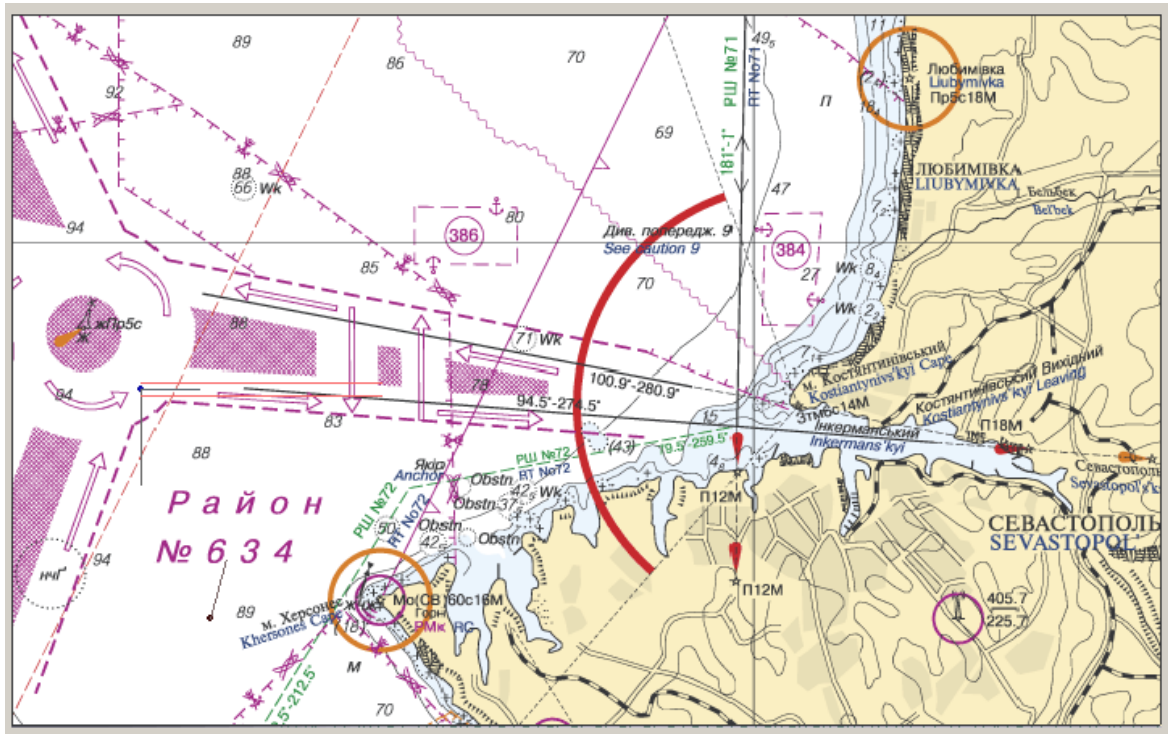


Рисунок 5.36 – Відображення смуги бічного зміщення

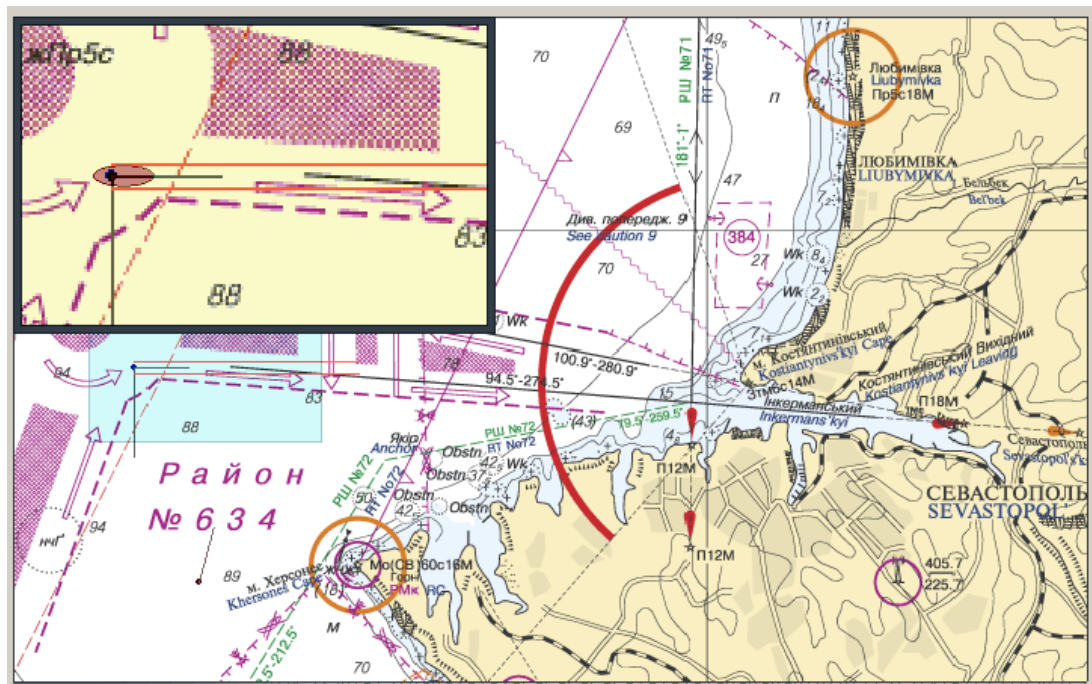


Рисунок 5.37 – Збільшене відображення смуги бічного зміщення

Так як загроза зіткнення суден відсутня, тому що курс судна не потрапляє в сектор недопустимих курсів, то судно не змінює напрямку руху.

Програвання маневру ухилення судна від небезпечної цілі відбувається при використанні клавіші «Timer», що показано на рисунку 5.39.

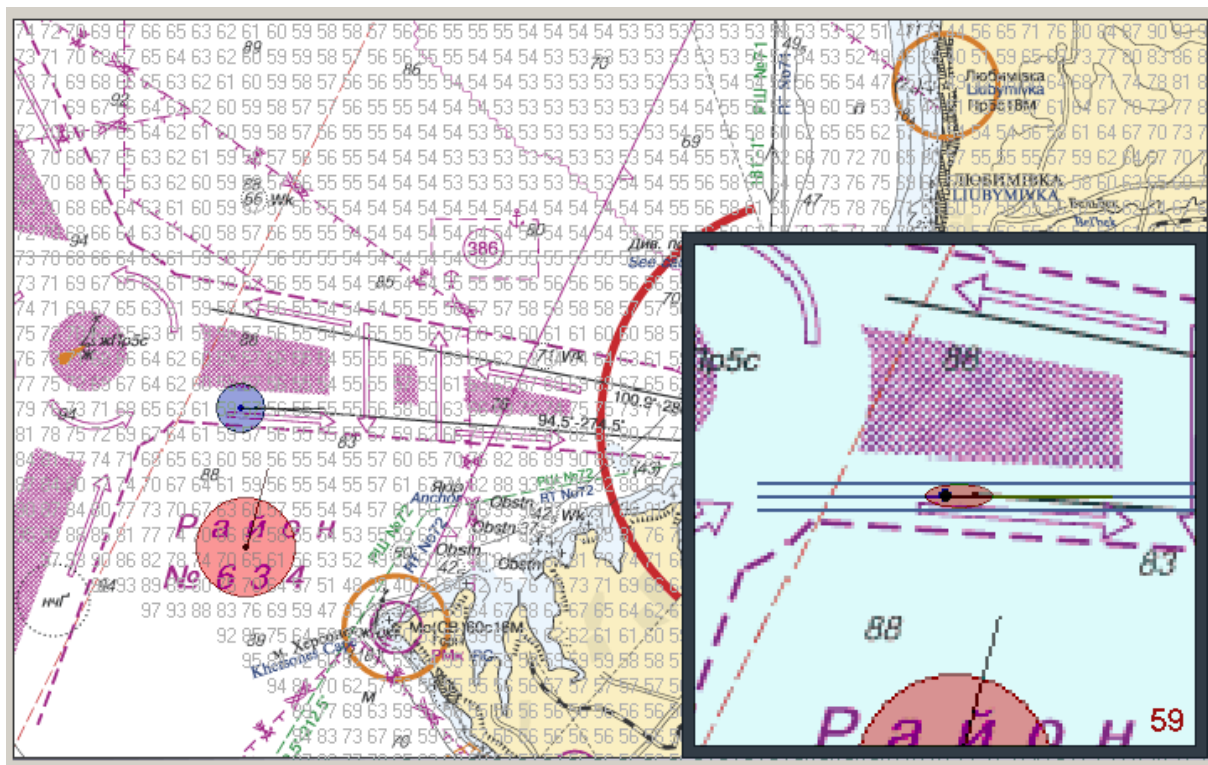


Рисунок 5.39 – Програвання маневру ухилення судна

Ситуація найкоротшого зближення судна з цілю показана на рисунку 5.40, причому дистанція між ними виявилась більша допустимої дистанції зближення, тобто розходження суден безпечне.

Для перевірки ефективності запропонованого способу відображення навігаційної ситуації та вибору безпечного курсу судна за допомогою описаної імітаційної програми програли 120 різних навігаційних ситуацій (по 40 ситуацій на кожну з трьох електронних карт).

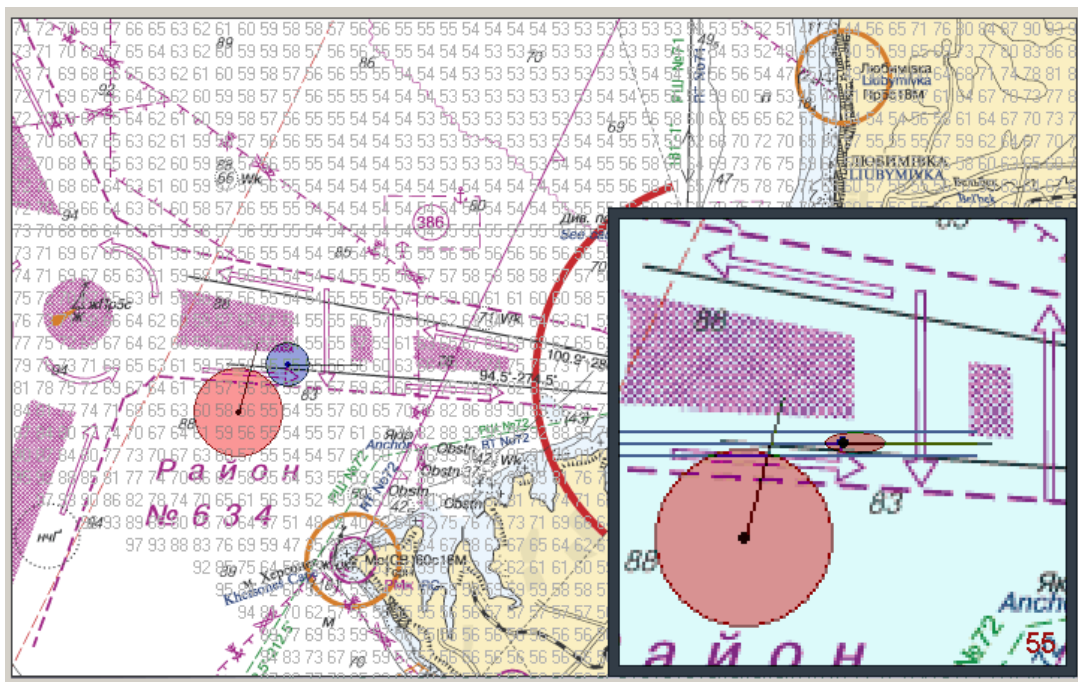


Рисунок 5.40 – Ситуація найкоротшого зближення

В результаті моделювання підвищення точності обсервації за допомогою функції суднової навігаційно-інформаційної системи, що розглядається, склало в середньому 17%. Вказане підвищення точності отримано за рахунок порівняння полів точностей для різних варіантів вибраних орієнтирів, які візуально здаються рівноточними. При імітаційному моделюванні було виявлено, що в 86% ситуацій судно може безпечно ухилитися від цілі та розійтися на заданій дистанції найкоротшого зближення, а у 14% безпечне розходження важко, причому в таких ситуаціях швидкість судна менша за швидкість цілі.

5.5. Можливості подальшого вдосконалення суднової інформаційної системи

В попередніх підрозділах даного розділу розглядалась суднова інформаційна система, яка підвищує безпеку судноводіння при плаванні в стислих водах без врахування погодних умов. Однак в умовах штормового

плавання виникають додаткові ризики, що можуть викликати аварійні випадки. В даному підрозділі розглянемо ризики плавання судна в штормових умовах та можливості зниження їх впливу на безпеку судноводіння, які можуть бути реалізовані в судновій інформаційній системі.

Судно, що проходить через штормові зони, піддається низці негативних впливів та явищ, які можуть зустрічатися в різних комбінаціях, таких як:

- Сильна хитавиця та качка, що супроводжуються ефектами ударів.
- Параметричний резонанс.
- Синхронна хитавиця (резонанс).
- Зниження поперечної остійності.
- Втрата керма.

Всі ці явища, ймовірно, можуть призвести до:

- Ризику пошкодження корпусу через напруження та вібрації (особливо на зустрічних хвилях).
- Ризику втрати палубного вантажу через значні прискорення на палубі.
- Ризику перекидання (у разі значного зниження поперечної остійності).
- Втоми екіпажу та пасажирів.
- Зниження швидкості в результаті доданого опору та виходу гвинта з ладу.

Загалом, проблему оптимального керування судном за несприятливих погодних умов можна вирішити у два етапи:

- попереднє планування на основі прогнозів погоди з вибором оптимального безпечного маршруту;
- прийняття рішень у режимі реального часу, що коригує режим керування судном (швидкість та курс) на основі фактичних умов судна та погодних умов у штормовому районі.

Приблизний прогноз поведінки судна на етапі планування маршруту можна приблизно оцінити, використовуючи загальні спрощені формули, як

представлено в [109]. Більш точний прогноз можна отримати за допомогою теорії смуг [110] або інших специфічних розрахунків.

Зазвичай основні невизначеності в таких розрахунках криються в стохастичній природі збурень навколишнього середовища та дуже нелінійній поведінці судна. Оцінка фактичного стану судна на борту на основі звичайних вимірювальних приладів, що присутні на більшості суден (клінометр, гірокомпас, лаг), не завжди є достатньою. Також будь-які прогнози, зроблені з використанням звичайних діаграм, можуть бути неточними через їх початкову спільність та ймовірність наявності двох або більше систем нерегулярних хвиль у цьому районі.

Таким чином, точніші розрахунки з використанням спеціального програмного забезпечення разом зі спеціальними датчиками підтримують доступ до реального стану судна та погоди, що необхідно для допомоги навігатору у вирішенні цієї складної проблеми. Підвищення ефективності обчислювальної техніки разом із використанням теорії ймовірностей, математичної статистики та концепції м'яких обчислень сьогодні робить можливою розробку інтелектуальної системи моніторингу та підтримки прийняття рішень судноводійом під час керування судном у морі (ICM – Інтелектуальна система мореплавства). Загалом, така система повинна мати такі властивості [111]:

- здатність працювати з неповною, неточною та застарілою інформацією;
- здатність до самоорганізації та навчання;
- стійкість;
- можливість адаптивної реакції на незаплановані події;
- орієнтація на інформацію від технічних пристроїв;
- можливість аналізу та прогнозування динаміки об'єкта;
- гарантований час реагування;
- інтеграція бортового програмного забезпечення;

- розділення функцій оператора та ІСМ.

ІСМ можна розділити на такі підсистеми (Рисунок 5.41):

- підсистема вимірювання та обробки даних;
- підсистема аналізу;
- підсистема прогнозування;
- підсистема прийняття рішень;
- підсистема діалогу (виведення);
- підсистема самоорганізації;
- оператор.

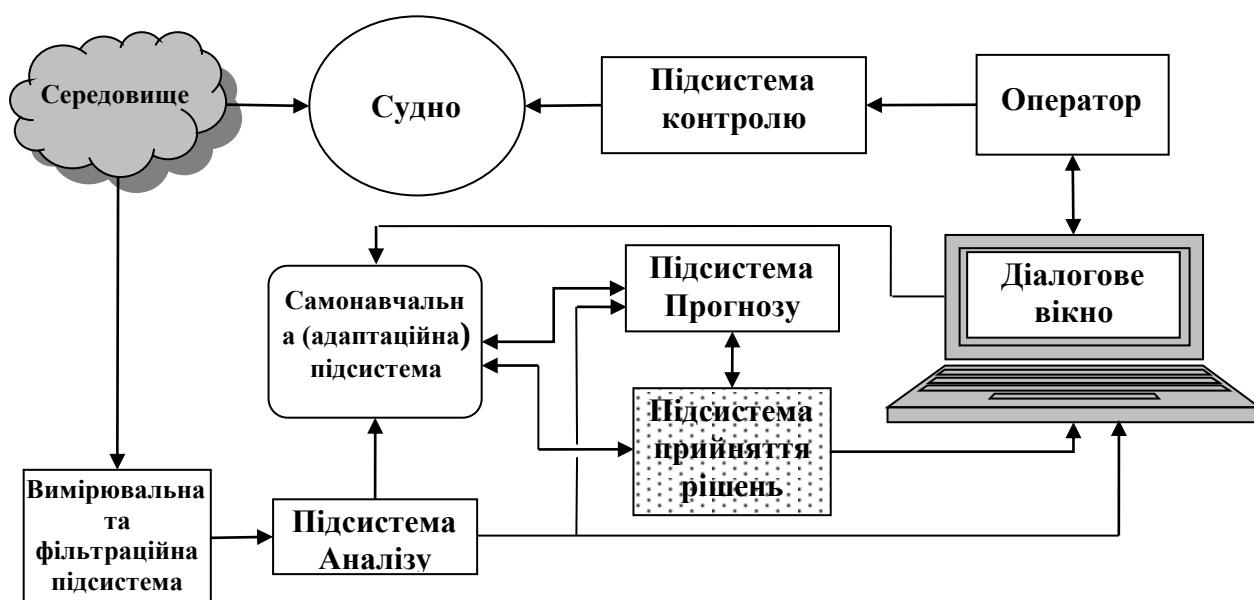


Рисунок 5.41 – Структура системи інтелектуального мореплавства

Очевидно, що цільовою частиною такої ІСМ є підсистема прийняття рішень, яка залежно від властивостей керованої установки та переважаючих умов генерує рекомендації для оператора, наприклад, на екрані дисплея, або надсилає сигнали безпосередньо до контуру керування. Як зазначалося вище, в умовах неповноти початкової інформації та невизначеності збурень навколишнього середовища досить важко точно розрахувати режим керування, необхідний для судна (курс, швидкість, зміщення баласту,

параметри автопілоту). Однак достатньо близьке рішення задачі можна отримати за допомогою самоналаштовуваних нечітких нейронних мереж, які широко описані в літературі, наприклад, [112].

Розглянемо лінгвістичний підхід.

Використання нечіткої логіки дозволяє розділити кожен вхідний та вихідний параметр на нечіткі множини, які спочатку можна визначити через лінгвістичні змінні («значна амплітуда качання», «частий слемінг» тощо), що складаються з пересічних функцій належності. Це означає, що кожне значення множини належить тому чи іншому лінгвістичному терміну з певною ймовірністю.

Наприклад, амплітуда качання $\theta_{\max} = 1^\circ$ належить терміну «значна амплітуда качання» з ймовірністю $P \rightarrow 0$, а терміну «мінімальна амплітуда качання» з ймовірністю $P \rightarrow 1$. Таким чином, дані, що надходять на вхід мережі, потім обробляються серією математичних перетворень, добре відомих з теорії нечіткої логіки. На виході, залежно від властивостей мережі, отримуємо нечітке або дискретне значення, що описує ту чи іншу рекомендацію. У лінгвістичних термінах логічний ланцюг обробки рекомендацій можна подати наступним чином:

- ВХІД
- стан моря: сила хвилі;
- відносний напрямок хвилі: лівий;
- довжина хвилі: середня;
- виникнення слемінгу: часте;
- виникнення кидання: значні амплітуди кидання;
- швидкість судна: повний хід;
- можливий ризик: сили згинання, що прикладаються до корпусу, перевищують безпечні межі;
- ВИХІД
- нечітке рішення:

- значно зменшити швидкість;
- нечітке обмежене рішення: зменшити швидкість на 4-5 вузлів;
- детерміноване рішення: зменшити швидкість на 4,5 вузла.

Слід зазначити, що такий формат може бути використаний для реалізації інтерфейсу як методу діалогу ICM з оператором, проте сам розрахунок базується на суворій та досить складній математичній основі, працюючи з дискретними, нечіткими та стохастичними значеннями.

Приведемо принципи роботи нейронної нечіткої мережі та метод адаптації.

Загалом принцип роботи нейронної нечіткої мережі для прийняття рішень можна описати наступним чином. Підсистеми вимірювання, аналізу та прогнозування надсилають на вхід мережі m антецедентів. Позначимо X ($M \times N$) $\in \mathfrak{R}$ як множину всіх можливих антецедентів, Y ($I \times J$) $\in \mathfrak{R}$ – множину всіх можливих висновків (рекомендацій). Позначимо M – кількість вхідних параметрів, N – розмір вектора всіх можливих значень вхідного параметра, I – кількість вихідних параметрів, J – розмір вектора всіх можливих значень вихідного параметра. Спочатку в заданій підсистемі будь-які m антецедентів можуть призвести до $I \times J$ висновків. Це означає, що обчислена ймовірність ефективності кожного рішення з поточним антецедентом $P(X) = 1$.

Очевидно, що процес навчання мережі полягає у знаходженні значень вагових коефіцієнтів, тобто визначенні релевантності зв'язків між антецедентами та висновками. Слід зазначити, що такі нейронні мережі містять нейрони конкурентного типу, тобто на виході мережі отримується не зважена сума всіх нейронів, а визначена кількість нейронів з найвищими вагами (спочатку цей принцип використовувався в задачах класифікації) [113].

Оскільки головною метою системи є рекомендація оператору оптимального режиму керування судном, задоволення цільової функції

оптимізації в цьому випадку означає мінімізацію загального впливу негативних факторів, що впливають на судно в негоду, наприклад: значні коливання судна в усіх напрямках, додатковий хвильовий опір, ефекти забивання та позеленіння, занурення гвинта, зниження поперечної стійкості, значна ймовірність протягування, перекидання тощо. Процес навчання підсистеми прийняття рішень можна розділити на наступні чотири етапи.

Етап 1. За допомогою експертної оцінки на рівні оператора відкидаються очевидно неправильні зв'язки між входами та виходами ($P(X) = 0$).

Етап 2. Використовується математична модель взаємодії між установкою та навколишнім середовищем. Обчислюючи ці дані за допомогою математичної моделі, ми отримуємо набір оптимальних рішень у першому наближенні.

Етап 3. Подальше коригування може бути виконане шляхом пробних випробувань у буксирних танках, що дозволяє значно зменшити частку неправильних рішень, прийнятих системою, встановленою на реальному судні. Після попереднього налаштування блоку ICM, який буде встановлено на судні. Зазвичай цей блок може виглядати як програмний додаток, інтегрований в інтегровану систему містка, що має доступ до всіх необхідних датчиків, або як повністю незалежний обчислювальний блок, безпосередньо підключений до вимірювальної системи.

Під час експлуатації судна, залежно від вимірювальної системи, встановленої на борту, частина даних, необхідних для оцінки мореплавних умов судна, отримується з датчиків (наприклад, кути крену, диференту та рискання), частина вводиться штурманом (наприклад, якщо на судні відсутні тензорні датчики).

Етап 4. Під час експлуатації судна описана вище система, залежно від стану моря та судна, генерує різноманітні можливі режими керування судном у порядку спадання (рішення з найбільшою ймовірністю ефективності –

зверху), а також результати прогнозу руху судна після виконання маневру, розраховані за допомогою математичної моделі. Оператор, у свою чергу, вибирає одне з рішень або створює своє власне, вводячи в систему нові задані параметри руху. Після виконання маневру система аналізує стан судна протягом заданого періоду та «робить висновок» про ефективність прийнятого рішення. Після цього вага цього рішення з попередніми антецедентами може бути збільшена або зменшена за заданим правилом, що забезпечує самонавчальні та адаптивні властивості ICM.

Таким чином, така концепція дозволяє, з одного боку, мінімізувати помилки в прийнятті рішень, що виникають через неадекватність базової математичної моделі, а з іншого – через некоректність рішень експертів або операторів. Однак згенеровані рішення базуються не лише на строгих математичних розрахунках, а й на статистичному аналізі інформації, що надходить від датчиків судна, та на «гарній мореплавній практиці».

Першим етапом вибору режиму керування судном має бути оцінка ризиків, пов'язаних з його діяльністю у складних погодних умовах. Математично рівень ризику можна визначити як добуток ймовірності небезпечної події P та її наслідку A . У нашому випадку визначаємо P як ймовірність досягнення визначених динамічних параметрів руху, які можуть призвести до низки негативних наслідків, пов'язаних з експлуатацією судна у шторм. Здійснюючи оцінку ризику експлуатації судна у складних погодних умовах, можна визначити ситуації, пов'язані з пошкодженням конструкції корпусу, суднових систем та механізмів, а також ситуації, що виникають через порушення технології обробки вантажів. Наприклад, досягнення визначених високих амплітуд хитання може призвести до низки ситуацій з різним рівнем наслідків, таких як зміщення або втрата вантажу, затоплення відсіків судна, перекидання. Отже, визначивши функцію $R = f(P, A)$, ми можемо побудувати відповідну матрицю ризиків (рисунок 5.42).

Виділимо наступні рівні ризику: незначний, низький, практично допустимий та недопустимий. Управління ризиками повинно охоплювати такі заходи, які дозволяють змінювати ймовірність певної події або зменшувати ступінь її наслідків.

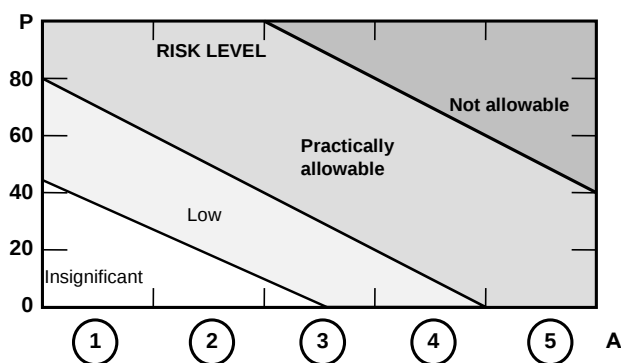


Рисунок 5.42 – Матриця ризиків

Під час вирішення задачі вибору оптимального режиму керування судном у бурхливому морі ми вважаємо ступінь наслідків постійною. З іншого боку, змінюючи налаштування керування судном, оператор може впливати на ймовірність досягнення таких параметрів руху судна, які лежать за межами практично допустимого ризику. У цьому випадку рівень ризику можна задати:

$$R = f(P_1, P_2, \dots, P_n), \quad (5.1)$$

де $P_1, P_2, \dots, P_n$ – ймовірності досягнення параметрів руху судна, які можуть призвести до певної небезпечної події.

Для проведення оцінки ризиків та пошуку оптимального режиму керування за заданих погодних умов необхідно визначити критерії, які дозволяють оцінити його ефективність, іншими словами, визначити безпечний та економічний режим керування.

Під час розробки відповідних критеріїв слід враховувати такі фактори:

- частоту та силу качання;
- частоту хвилі;
- амплітуди руху;
- напруження корпусу;
- оголення гвинта;
- прискорення в різних точках судна;
- примусове та контрольоване зниження швидкості;
- відхилення від запланованого маршруту.

Перші шість факторів визначають безпеку експлуатації судна, два інші – ефективність. Табл. 5.1 загальних критеріїв обмеження працездатності суден у хвилях наведена нижче [114,115].

Таблиця 5.1. – Загальні критерії обмеження працездатності суден

Критерій	Крукшанк і Ландсберг (США)	Тасакі та ін. (Японія)	НОРДФОРСК, 87 (Європа)	НАТО STANAG 4154 (США)
Середньоквадратичне значення вертикальних прискорень на прямому перпендикулярі	0.25 g	0.8 g / P = 10 ⁻³	0.275g (L _{pp} < 100 м) 0.05g (L _{pp} > 300 м)	-
Середньоквадратичне значення вертикальних прискорень на містку	0.2 g	-	0.15g	0.2g

Середньоквадратичне значення поперечних прискорень на містку	-	0.6 g / P = 10 ⁻³	0.12g	0.1g
Середньоквадратичне значення крену	15°	25°/ P = 10 ⁻³	6°	4°
Середньоквадратичне значення тангажу	-	-	-	1.5°
Ймовірність засікання	0.06	0.01	0.03 (L _{pp} < 100) 0.01 (L _{pp} > 300)	-
Ймовірність намокання палуби	0.07	0.01	0.05	-
Ймовірність легкого гвинта	0.25	0.1	-	-

За результатами опитування 100 судноводій рівня управління (капітанів та старших помічників капітана), які проходили курс керування судном у Інституті післядипломної освіти “Центр підготовки та атестації плавскладу” НУОМА, були отримані критерії працездатності.

У табл. 5.2 наведено емпіричні значення критеріїв працездатності судна. Використання останніх дає можливість виконати більш детальну, підкріплену особистим морським досвідом мореплавців, оцінку стану судна у хвилях. Слід зазначити, що оцінка ризику лише за пороговими значеннями, визначеними для ряду критеріїв, є неефективною.

Тому в цьому випадку ми пропонуємо застосовувати не двозначну функцію стану, а числову або лінгвістичну функцію, визначену в діапазоні між двома екстремальними значеннями: «0» – «1», «найкраще» –

«недопустиме» (мінімальний – максимальний рівень ризику). В якості граничного значення в кожному випадку ми приймаємо узагальнений критерій безпеки – граничний рівень ризику, за якого експлуатація судна є безпечною у визначених умовах.

Таблиця 5.2. – Результати опитування навігаторів рівня управління

	Амплітуда Бортової хитавиці °	Інтенсивність слемінгу	Намокання палуби, інтенсив- ність	Падіння швидкості, %	Відхилення від курсу, °
Малий	< 7	< 5	< 5	< 13	< 20
Не небезпечно	< 14	< 11	< 10	< 24	< 38
Істотний	< 23	< 19	< 20	< 46	> 40
Небезпечно	> 26	> 23	> 23	> 58	-

Розглянемо систему оцінки на основі нечіткої логіки.

Для реалізації вищезазначеної пропозиції на основі багатокритеріальної системи оцінки ефективності мореплавства на основі нечіткої логіки було запропоновано наступне (рисунок 5.43). Як дані, що використовуються для генерації відповідних підсистем нечіткого виводу (ПНВ), були взяті існуючі міжнародні критерії працездатності суден та результати експертного запиту. Алгоритм оцінки ефективності мореплавства працює наступним чином. Параметри, прийняті на вхід системи, проходять через структуру ПНВ 1-го рівня. Як результат на виході ми отримуємо ряд показників за кожним критерієм (наприклад, амплітуда хитання: «мала», «суттєва» або «небезпечна»). Показники можуть бути задані як у лінгвістичних термінах, так і у визначеному числовому діапазоні. Під час визначення функцій належності (ФН) системи запропоновано формувати граничні умови на

основі існуючих міжнародних критеріїв працездатності, а проміжні значення ФН – шляхом апроксимації попередньо перетворених даних експертного запиту. Після цього отримані показники проходять ПНВ 2-го рівня, на виході якого отримується загальна оцінка за набором умов (рівень ризику, ефективність). Оцінка цільової функції здійснюється на останньому етапі шляхом перетворення локальних показників безпеки та економічності через ПНВ 3-го рівня.

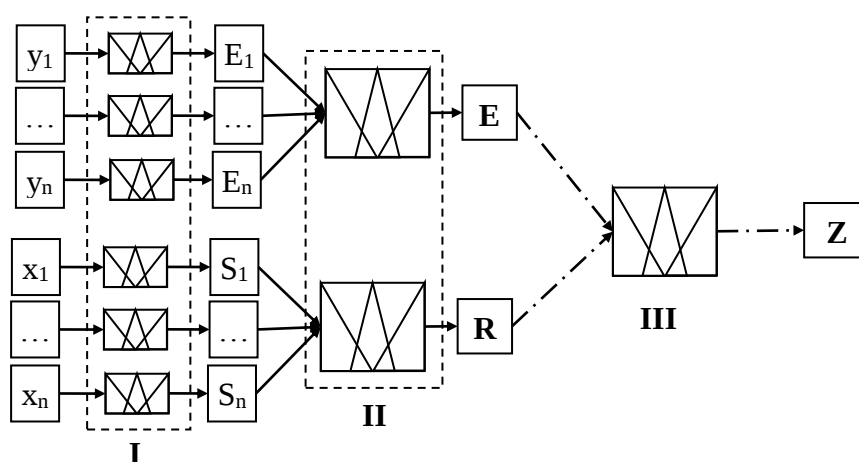


Рисунок 5.43 – Система оцінки ефективності мореплавства за багатьма критеріями $x_1 \dots x_n$ – параметри руху, $S_1 \dots S_n$ – відповідні коефіцієнти, $y_1 \dots y_n$ – економічні параметри, $E_1 \dots E_n$ – відповідні коефіцієнти, R – рівень ризику, E – рівень економічної ефективності, Z – цільова функція.

Процес розробки підсистеми FIS можна розділити на такі етапи.

ЕТАП 1. Визначення функцій належності μ детермінованих вхідних x та вихідних y змінних до нечітких лінгвістичних множин A та B . Це включає формування простих тверджень в антецедентах та висновках правил, а також статистичну оцінку належності визначених параметрів до відповідних лінгвістичних термінів.

ЕТАП 2. Нечіткі правила П формування бази даних на основі нечітких лінгвістичних ансамблів А та В. На цьому етапі важливо забезпечити повноту та узгодженість бази даних.

ЕТАП 3. Визначення алгоритму нечіткого виводу, такого як алгоритми Мамдані, Такагі-Сугено, Цукамото, Ларсена та інших. У нашому випадку всі три модулі FIS виглядають як структури MISO (багато входів-один вихід) та побудовані на основі алгоритму нечіткого виводу Мамдані [112]. Більш детальний процес формування баз даних функцій належності та правил описано у [116,117].

Результати досліджень, отриманих у роботах [116,117,118], та розробка вищеописаної системи оцінки мореплавства судна дозволили розробити метод вибору оптимального режиму керування судном за несприятливих погодних умов (Рисунок 5.44). Метод можна описати наступним чином. Перед рейсом за відомих умов завантаження розраховуються параметри руху судна X у всьому діапазоні довжин хвиль, швидкостей судна та курсів (λ, U, μ) . За фактичними хвильовими спектрами S_ζ та X слід отримати діаграми руху на нерегулярних хвилях. Для визначених параметрів руху (U, μ) слід визначити цільову функцію Z (рівень ефективності та обґрунтованого ризику). Тут метою оптимізації є знаходження мінімального значення Z за заданих погодних умов, яке відповідає мінімально можливому ризику та відхиленню від запланованого маршруту. Пошук оптимального режиму керування пропонується виконувати методом генетичних алгоритмів (ГА).

На рисунку 5.45 наведено робочий приклад запропонованого алгоритму.

Контейнеровоз рухається по супутніх хвилях (хвиля зустрічається з правого борту, 135°), зазнаючи значної хитавиці з амплітудою до 36° . Такий динамічний стан судна оцінюється системою як неприпустимий. З даних запитів навігатора визначено, що існують два класичних рішення цієї задачі. Перше – повернути на зустрічні хвилі та сповільнитися залежно від ударів.

Друге – увійти в чітко супутні хвилі ($\mu = 180^\circ$) та збільшити швидкість. Рішення машини в цьому випадку – поставити хвилю на курсовий кут 160° та збільшити швидкість до 25 вузлів.

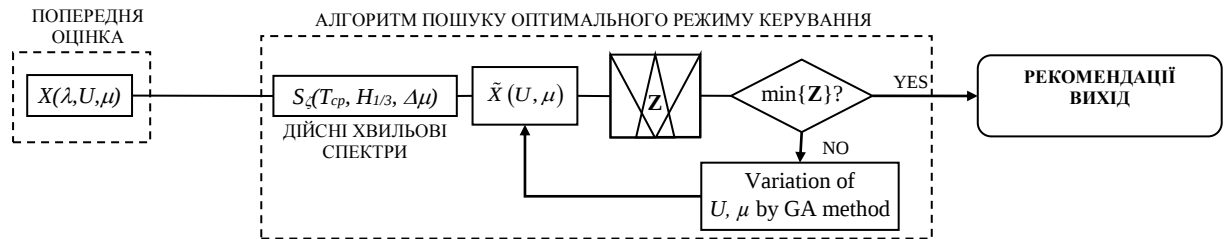


Рисунок 5.44 – Блок-схема методу вибору оптимального режиму керування судном за несприятливих погодних умов

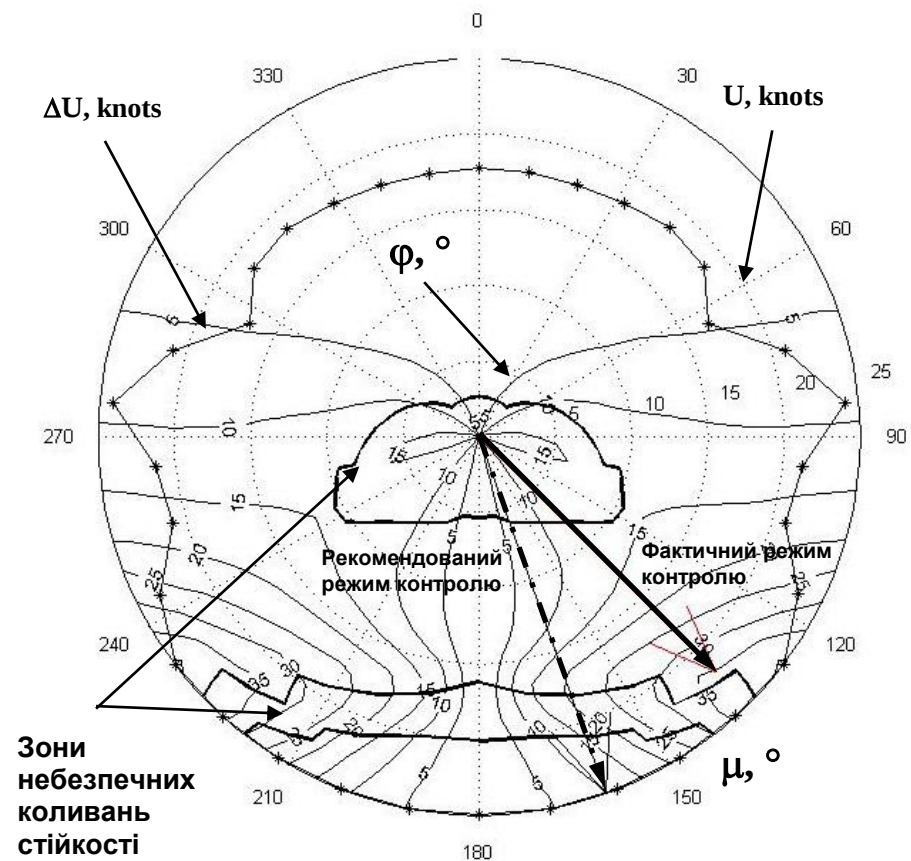


Рисунок 5.45 – Ілюстрація роботи алгоритму вибору оптимального режиму керування судном

Аналізуючи діаграму шторму на рисунку 4, можна зробити висновок, що таке рішення цієї задачі є найефективнішим, оскільки при невеликій зміні курсу та збільшенні швидкості судно зазнаватиме значно меншої хитавиці (амплітуда 10°). Оцінка стану судна у формі хвиль.

Параметри судна: L = 200 m, B = 30 m, GM = 1.0 m;				
Параметри хвилі: H _{1/3} = 10 m, T _{cp} = 11.5 s				
Режим контролю				
Фактичний / Рекомендований				
Кут зустрічі хвилі		Швидкість судна (U _p = 25 knots)		
135 / 160°		22 / 25 knots		
Оцінка стану працездатності				
Значна амплітуда качання	Зелена вода: Ймовірність// Інтенсивність	Слемінг Ймовірність// Інтенсивність	Зниження швидкості	Відхилення від курсу
36 / 10°	0// 0 разів/годину	00// 0 разів/годину	0 knots	0/25°
Недопустимо/Не небезпечно	NA	NA	NA	Помірний
Чи знаходиться посудина в зоні резонансу?		No		
Рівень ризику		0.88/0.1	Недопустимо / Допустимо	
Оцінка економічної ефективності		0.26/0.29	Економний / Економний	
Загальна оцінка		0.88/0.33	Недопустимо / Добре	

5.6. Висновки до п'ятого розділу дисертації

У розділі наведено аналітичні вирази, які використовуються у алгоритмі відображення навігаційної ситуації. Представлені формули розрахунку показника точності в кожній точці району плавання судна з урахуванням числа орієнтирів, що використовуються для визначення місця судна, їхнього геометричного фактора та точності вимірюваних навігаційних параметрів.

Наведено вирази для оцінки ширини смуги лінійного зміщення судна щодо програмної траєкторії плавання, що виникає після його маневру. Подано вирази для визначення моментів часу першого і другого максимальних зсувів, а також формули для розрахунку їх величини. Аналітичні вирази наведені для гірокомпасу з твердим маятником і для коригованого гірокомпасу з непрямым керуванням.

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

Наведено опис імітаційної моделі, що дозволяє відображати в графічному режимі навігаційну ситуацію з розглянутими параметрами на електронній карті, причому при імітаційному моделюванні надається можливість використання однієї з трьох електронних карт підходу до портів. На електронну карту наносяться позиції судна та однієї цілі. Є можливість вибору безпечного маршруту руху судна, враховуючи візуалізацію значень параметрів навігаційної ситуації. Імітаційна модель дозволяє проводити програвання обраного маршруту проходження з реєстрацією значень показника точності поля.

В розділі наведено результати імітаційного моделювання для трьох районів плавання, при якому задавалися навігаційні ситуації та графічне

відображення їх параметрів, яким вибиралися безпечні маршрути подальшого прямування судна.

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

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Підвищення безаварійності управління судном зменшує ризики для людського життя, навколишнього середовища та майна; захист цих цінностей становить одну з найсуттєвіших проблем системи безпеки мореплавства.

Рух суден в обмежених акваторіях ускладнюється високою інтенсивністю навігації та наявністю перешкод, що створює передумови для виникнення аварійних ситуацій.

Відображення ризиків навігаційної ситуації в цілісний об'єкт, який комплексно характеризує положення судна відносно програмної траєкторії руху, навігаційних небезпек, рухомих цілей та навігаційних засобів, формується в усвідомленні судноводія і слугує підставою для вибору рішення. Поточний обсяг інформації часто перевищує його пропускну спроможність, внаслідок чого можливе виникнення аварійних ситуацій. Отже, необхідна розробка методів комплексного урахування чинників навігаційних аварій та їхнього представлення у формі адекватного сприйняття для судноводія з метою прийняття рішень, які забезпечують безаварійну навігацію. Ця проблематика є предметом даного дослідження й становить актуальний та перспективний науковий напрям.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод синтезу та відображення навігаційної ситуації в судовій інформаційній системі, який відрізняється тим, що дозволяє комплексно враховувати вплив суттєвих ризиків навігаційної аварійності на безпеку судноводіння, забезпечуючи вибір безпечного маршруту судна в обмежених умовах.

У дисертаційній роботі:

– вперше запропоновано метод комплексного врахування ключових ризиків навігаційних аварій, який відрізняється можливістю одночасного

урахування навігаційних, технічних та людських факторів, що дозволяє обґрунтовано підвищувати рівень безпеки судноводіння в обмежених умовах;

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

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

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

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути упровадженні при розробці судових навігаційних систем для підвищення точності судноводіння та в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість зниження негативних наслідків впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння. Кількісним показником являється мінімізація втрат від можливих навігаційних аварій .

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.

Розробка математичних моделей і результати імітаційного моделювання, проведеного в рамках теоретичного дослідження, підтверджують наукову достовірність одержаних результатів дисертаційної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. K. Wróbel, M. Gil, Y. Huang, R. Wawruch, "The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques", A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships Sustainability, 14, 2022, 16516.
2. A. Jesús, García Maza, Reyes Poo Argüelles, "COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis", *Ocean Engineering*, nn. 261, pp. 1-14, 2022.
3. J. Lisowski, "Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation", *Advances in Safety and Reliability*, Vol. 2, pp. 1285-1292, 2005.
4. J. Lisowski "Game control methods in navigator decision support system", *The Archives of Transport*, Vol. XVII, nn. 3, pp. 133-147, 2005.
5. B-OH. Eriksen, G. Bitar, M. Breivik and A.M. Lekkas, "Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17", *Front. Robot.* , 2020.
6. J. Lisowski, "Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*, 2005, pp. 71 – 78.
7. Y.A. Ahmed, M.A. Hannan, M.Y. Oraby, A. Maimun, "COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters", *J. Mar. Sci. Eng*, nn. 9, 2021.
8. Thomas Statheros, Gareth Howells, Klaus McDonald-Maier, "Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques", *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129-142, 2008.
9. Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R. R. Negenborn & P. H. van Gelder, "Ship collision avoidance methods: State-of-the-art", *Safety Science*, nn. 121, pp. 451-473, 2020.

10. A. Lazarowska, "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing", *Remote Sens*, nn.13, pp. 32-65, 2021.

11. L. Vagushchenko, A. Vagushchenko, "Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, doi:10.12716/1001.17.03.14, pp. 625-633, 2023.

12. M. Martelli, S. Žuškin, R. Zacccone, I. Rudan, "A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, doi:10.12716/1001.17.02.11, pp. 347-353, 2023.

13. Л.Л. Вагущенко, *Расхождение с суднами смещением на параллельную линию пути*, Одесса: Фенікс, 2013.

14. В.Э. Пятаков, О.А.Петриченко, В.В.Калюжный, "Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями", *Автоматизация судовых технических средств*, № 24. сс. 81-87, 2018.

15. Е.А. Петриченко, О.А. Петриченко, "Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений", *Судовождение*, Вып. 28, сс. 120-130, 2018.

16. K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf, "Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25-30, 2009.

17. K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes, "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, DOI:10.12716/1001.08.01.15, pp. 131-141, 2014.

18. C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen, "Identification of Ship Maneuvering

Model Using Extended Kalman Filters", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105-110, 2009.

19. M. Ljacki, "Intelligent Prediction of Ship Maneuvering", *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, DOI:10.12716/1001.10.03.17, pp. 511-516, 2016.

20. Y. Kalinichenko, I. Burmaka, "Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(84), DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85839, pp. 20-31, 2016.

21. Е.В. Калиниченко, "Учет характеристик поворотливости при расчете параметров поворота судна", *Водный транспорт*. №2 (20), сс. 63 – 67, 2014.

22. Е.В. Калиниченко, "Обеспечение требуемой точности поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории", *Автоматизация судовых технических средств*, № 20, сс. 52-58, 2014.

23. E.W. Rymarz, "The determination of a minimum critical distance for avoiding action by a stand-on vessel as permitted by Rule 17a) ii)", *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, pp. 207 – 212, 2007.

24. J. Lisowski, "The dynamic game models of safe navigation", *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, pp. 23 – 30, 2007.

25. Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R. Negenborn & P. H. van Gelder, "Ship collision avoidance methods: State-of-the-art", *Safety Science*, № 121, pp. 451-473, 2020.

26. A. Lazarowska, "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing", *Remote Sens*, № 13, pp. 32-65, 2021.

27. Н.Н. Цымбал, Р.Ю. Бужбецкий, "Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении", *Судовождение*. № 12, сс. 124 -129, 2006.

28. А.С. Мальцев, Е.Е. Тюпиков, И.И. Ворохобин, *Маневрирование судов при расхождении*, Одесса: Морской тренажерный центр, 2013.
29. Y.A. Ahmed, M.A. Hannan, M.Y. Oraby, A. Maimun, "COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters", *J. Mar. Sci. Eng.*, № 9, 790, 2021.
30. P. Banaś, M. Breitsprecher, "Knowledge Base in the Interpretation Process of the Collision Regulations at Sea", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 5, No. 3, pp. 359-364, 2011.
31. B. Eriksen, G. Bitar, M. Breivik and A.M. Lekkas, "Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17", *Front. Robot.*, 2020.
32. E. Hannaford, P. Maes & E. van Hassel, "Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey", *WMU J Marit Affairs*, No. 21, pp. 233–266, 2022.
33. A. Jesús, García Maza, Reyes Poo Argüelles, "COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis". *Ocean Engineering*, No. 261, pp. 1-14, 2022.
34. L. P. Perera, B. M. Batalden, "Possible COLREGs Failures under Digital Helmsman of Autonomous Ships", *OCEANS*, Marseille, France, pp. 1-7, 2019.
35. Z. Pietrzykowski, R. Malujda, "Applicability of fuzzy logic to the COLREG rules interpretation", *Scientific Journals*, Maritime University of Szczecin. No. 30 (102), pp. 109–114, 2012.
36. M. Salous, A. Hahn, C. Denker, "COLREGs-Coverage in Collision Avoidance Approaches: Review and Identification of Solutions", In 12th International Symposium on Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference, Hamburg, pp. 1-10, 2016.
37. J. M. Varas, S. Hirdaris, R. Smith, P. Scialla, W. Caharija, Z. Bhuiyan, T. Mills, W. Naeem, L. Hu, I. Renton, D. Motson, E. Rajabally, "MAXCMAS Project – Autonomous COLREGs Compliant Ship Navigation", In 16th

International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, Cardiff, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, pp. 454-465, 2017.

38. K. Wróbel, M. Gil, Y. Huang, R. Wawruch, "The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques", A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships Sustainability, No. 14, 16516, 2022.

39. C.Tam, R. Bucknall, A. Greig, "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters," *The Journal of Navigation*, vol. 62 (3), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463308005134>, pp. 455-476, 2009.

40. И.А. Бурмака, *Теория и методы внешнего оптимального управления судами в ситуации опасного сближения: монография*. Одесса: НУ "ОМА", 2019.

41. А.С. Мальцев, Е.Е. Тюпиков, И.И. Ворохобин, *Маневрирование судов при расхождении*, 3-е изд., перераб. и доп., Одесса: Морской тренажерный центр, 2013.

42. Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков, *Гибкие стратегии расхождения судов*. Одесса: КП ОГТ, 2007.

43. D.G. Kim, K. Hirayama, G.K. Park, "Collision Avoidance in Multiple-Ship Situations by Distributed Local Search," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 18(5), doi: 10.20965/jaciii.2014.p0839, pp. 839-848, 2014.

44. R. Smierzchalski, Z. Michalewicz, "Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 4(3), doi: 10.1109/4235.873234, pp. 227-241, 2000.

45. A. Lazarowska, "Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation," *Journal of Navigation*, vol. 68(02), doi: <https://doi.org/10.1017/S0373463314000708>, pp. 291-307, 2014.

46. M.C. Tsou, C.K. Hsueh, "The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm," *Journal of Marine Science and Technology*, Taiwan, vol. 18(5), doi: 10.51400/2709-6998.1929, pp. 746-756, 2010.
47. Y.T. Kang, W.J. Chen, D.Q. Zhu, J.H. Wang, Q.M. Xie, "Collision Avoidance Path Planning for Ships by Particle Swarm Optimization," *Journal of Marine Science and Technology*, Taiwan, vol. 26(6), doi: 10.6119/JMST.201812_26(6).0003, pp 777-786, 2018.
48. A.V. Savkin, , C. Wang, "A simple biologically inspired algorithm for collision-free navigation of a unicycle-like robot in dynamic environments with moving obstacles", *Robotica*, vol. 31(06), doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574713000313>, pp. 993-1001, 2013.
49. J.F. Zhang, D. Zhang, X.P. Yan, S. Haugen, C.G. Soares, "A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs," *Ocean Engineering*, vol. 105, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>, pp. 336-348, 2015.
50. R.A. Zacccone, "COLREG-Compliant Optimal Path Planning for Real-Time Guidance and Control of Autonomous Ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 9 (4), doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9040405>, pp. 405, 2021.
51. A.A. Вагущенко, Л.Л. Вагущенко, "Численный метод выбора маневров расхождения с несколькими судами," *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VIII(27), issue: 224, doi: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-19>, с. 74-80, 2020.
52. J. Artyszuk "Inherent Properties of Ship Manoeuvring Linear Models in View of the Full-mission Model Adjustment", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 10, No. 4, doi: 10.12716/1001.10.04.08, pp. 595-604, 2016.
53. В. П. Богданов, Я. Л. Виткалов, С. В. Глушков, А. С. Потапов и др. *Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна*, Питер., 2006.

54. В.В. Сахаров, Я.Н. Каск, В.В. Николаев, Сахаров, "Алгебраический метод синтеза корректирующих устройств системы управления динамическим объектом", *С.-Петербург. ун-т вод. коммуникаций. Инф. поддержка систем контроля и упр. на трансп.*, сс. 15-21, 1998.

55. Senda Shoichi, Kobayashi Hiroaki, Mizuno Hiroyuki, Arai Shiro, "Study on the characteristics of ship-handling on passing fairway", *J. Jap. Inst. Navig.*, №102, pp. 301-308, 2000.

56. В.И. Зайков, "Современное состояние математических моделей управляемого движения судна и их применение для проектирования водных путей", *Внутр. вод. пути России: Ист. Современность Перспективы: Матер. и тез. докл. регион, науч.-техн. конф., по-свящ. 200-летию гос. упр. вод. коммуникациями России*, Санкт-Петербург, 13 марта 1998, сс. 91-101, 1998

57. С.Н. Мешалкин, М.М. Чиркова, "Алгоритм управления рулевым приводом с возможностью коррекции принятых решений", *Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп.*, ч. 3, № 283, сс. 140-141. 1999.

58. И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков, *Управление судами в ситуации опасного сближения*, Саарбрюккен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.

59. И. Р. Фрейдзон, *Моделирование корабельных систем управления*, Л.: Судостроение, 1975.

60. В.Е. Кудряшов, "Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов", *Известия ЛЭТИ*, № 206, сс. 15-19, 1976.

61. В.Е. Кудряшов, "Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами", *Судостроение*, №5, сс. 35-40, 1978.

62. И.А. Бурмака, А.И. Бурмака, Р.Ю. Бужбецкий, "Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов", LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.

63. Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris, "What is the accuracy of DGPS?", *J. Navig*, vol. 58, № 2, pp. 207-225, 2005.

64. Ю.А. Комаровский, "Проблемы оценки точности определения места судна приёмниками СРНС Навстар GPS", *Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост.*, № 2, сс. 100-107, 2006.

65. И.И. Ворохобин, Ю.В.Казак, В.В.Северин, *Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах*. Saarbrücken, Deutschland:– LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.

66. В.В. Северин, "Оценка вероятности безопасной проводки судна стесненным маршрутом", *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, сс. 94 -98, 2017.

67. И.И. Ворохобин, "Влияние закона распределения погрешности бокового отклонения на вероятность безопасного прохождения судном стесненного маршрута", *East European Scientific Journal*, №5 (33), сс. 30 – 37, 2018.

68. Д.А. Бузовский, "Имитационное моделирования влияния структуры радиолокационной системы обращенного типа на точность контроля позиции судна", *Судовождение*, № 12. сс. 19 – 25, 2006.

69. В.Т. Кондрашихин, *Определение места судна*. М.: Транспорт, 1989.

70. D. A. Hsu, "An analysis of error distribution in navigation", *The Journal of Navigation*, Vol. 32, no. 3. pp. 426 – 429, 2003.

71. Е.Ф. Мельник, "Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения", *Судовождение*, № 5. сс. 65 – 73. 2002.

72. В.Е. Сикирин, "Описание навигационных погрешностей с помощью обобщенного распределения Пуассона", *Судовождение*, Вып. 26. сс. 152 – 156,. 2016.

73. Д.В. Астайкин, Б.М. Алексейчук, В.Е. Сикирин, "Анализ особенностей обобщенного пуассоновского закона и смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений" Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической

конференции, 15 сентября 2017 – Харьков: научно-информационный центр «Знание», сс. 19 – 24, 2017.

74. I. Vorokhobin, O. Haichenia, V. Sikirin and I. Fusar, "Application of Orthogonal Decomposition of Mixed Laws' Density Distribution of Navigational Measurement Errors", In the 25th International Scientific Conference Transport Means 2021 Sustainability: Research and Solutions, 06.10, 2021, pp. 477-481.

75. I. Vorokhobin, O. Haichenia, V. Sikirin and V. Severin, "Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements", In the 24th International Scientific Conference Transport Means 2020 Sustainability: Research and Solutions, 30.09, 2020, pp. 707-711.

76. D. Astaykin, A. Golikov, A. Bondarenko, O. Bulgakov, "The Effectiveness of Ship's Position Using the Laws of Distribution of Errors in Navigation Measurements", In the 24th International Scientific Conference Transport Means 2020 Sustainability: Research and Solutions, 30.09, 2020, pp. 662-666.

77. Б.М. Алексейчук, "Залежність точності обсервації від суттєвих чинників та шляхи її покращання", *Судноводіння*, Вип. 36, DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.10-19, сс. 10-19, 2024.

78. Кристиан Краевски, "АРГО-электронная система информации о состоянии фарватера", *Радиоэлектрон, и телекоммуникации*, № 1, сс. 62-66, 2002.

79. R. Bober, P. Grodzicki, Z. Kozlowski and A. Wolski, "The DGPS system improve safety of navigation within the port of Szczecin", In the 12 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 23.05, 2005, pp. 192-194.

80. І.О. Бурмка, Б.М. Алексейчук, "Точність координат визначення місця судна, розрахованих методом найменших квадратів, у разі надмірних вимірів", *Судноводіння*, Вип. 35, DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.10-21, сс. 10-21, 2023.

81. В.М. Мудров, В.Л. Кушко, *Методы обработки измерений*, М.: Советское радио, 1976.
82. В.В. Степаненко. "Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов", *Судовождение*, Вып. 2, сс. 201 – 209, 2000.
83. Kubo Masayoshi, Sakakibara Shigeki, Hasegawa Yoshimi and Nagaoka Tadao. "Research of method of calculation of probability of collision of ship with the rectangular bull of bridge at tearing down by wind and flow", *Jap. Inst. Navig.* no. 104, pp. 225-233, 2001.
84. Алексейчук Б.М. Модели формирования законов распределения погрешностей навигационных измерений/ Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е.// Автоматизация судовых технических средств: науч. – техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: ОНМА. – С. 3 – 11.
85. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrücken, Deutschland/ Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.
86. Ворохобин И.И. Эффективность применения полиномов Эрмита для ортогонального разложения плотностей распределения навигационных погрешностей/ Ворохобин И.И., Сикирин В.Е., Фусар И.Ю.// East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 24-30.
87. Алексейчук Б.М. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных линиях положения, полученная имитационным моделированием / Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е., Астайкин Д.В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 47 – 51.
88. Алексейчук Б.М. Сравнительная характеристика смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений с обобщенным пуассоновским законом/Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е.// Автоматизация судовых технических средств: науч. – техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: ОНМА. – С. 3 – 8.

89. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения / Кондрашихин В.Т. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.

90. Кондрашихин В.Т. О погрешностях измерений/ Кондрашихин В.Т. // Геодезия и картография.– 1977. – № 5. – С. 11-16.

91. Кондрашихин В.Т. Определение наиболее вероятного значения повторяющейся ошибки / Кондрашихин В.Т., Якшевич Е.В. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1972. – Вып. 157. – С. 42-49.

92. [92] Кондрашихин В.Т. Зависимость между точностью и надежностью навигации / Кондрашихин В.Т. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1973. – Вып. 173. – С. 41-49.

93. Сорокин А.И. Гидрографические исследования Мирового океана / Сорокин А.И. – Л.: Гидрометиздат, 1980. – 287 с.

94. Широков В. М. Распределение погрешностей обсервации при использовании методов корреляционной навигации /Широков В. М.// Судовождение. – 2003. – № 6.- С. 154-158.

95. Широков В. М. Результаты имитационного моделирования обсерваций судна в стесненных условиях / Широков В. М. // Судовождение. – 2004. – № 8. – С. 103 – 107.

96. Мельник Е.Ф. Приближенное описание смешанных распределений погрешностей навигационных измерений / Мельник Е.Ф. // Автоматизация судовых технических средств: науч. –техн. сб. – 2002. – Вып. 7.- Одесса: ОГМА. – С. 96 – 100.

97. Корн Г. Справочник по математике / Корн Г., Корн Т. – М.: Наука, 1984.- 832 с.

98. Ворохобин И.И. Разработка теории и методов оценки и повышения надежности судовождения: монография / Ворохобин И.И.- Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 308 с.

99. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / Ворохобин И.И.,

Северин В.В, Казак Ю.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 40 – 47.

100. Ворохобин И.И. Количественная оценка безопасности судовождения / Ворохобин И.И., Северин В.В., Казак Ю.В. // Автоматизация судовых технических средств: науч. – техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 34 – 39.

101. Астайкин Д.В. Эффективность координат судна при смеси нормально распределенных погрешностей выборки / Астайкин Д.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 10-13.

102. Астайкин Д.В. Смешанные законы распределения вероятностей случайных погрешностей навигационных измерений/ Астайкин Д.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 – С. 7-14.

103. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. – Одесса: Феникс, 2004. – 302 с.

104. Смирнов Е.Л. Технические средства судовождения. Теория: Учебник для вузов / Смирнов Е.Л. , Яловенко А.В., Якушенков А.А. – М.: Транспорт, 1988. – 376 с.

105. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. – №4. – С. 32- 36.

106. Бузовский Д.А., "Зависимость точностного критерия радиолокационной системы обращенного типа от ее структуры", *Судовождение*, Вып. 11, сс. 14 – 19, 2006.

107. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16/ ОНМА. – Одесса, 2004. – 22 с.

108. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Вагущенко Л.Л. – Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.

109. Kozir L. A., Aksutin L. R. Ship handling in storm. – 3-rd edition. – Odessa: Phoenix, 2006 – 218 p.
110. Journée J.M.J., Massie W.W. Offshore Hydromechanics/ Delft University of Technology – 2001. – 570 p.
111. Intelligence systems in marine research and technology / Nechayev U. I. et al. SPB: SPB STMU, 2001. – 395 p.
112. Borisov V.V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. Fuzzy models and networks. – M.:Hot Line – Telecom, 2007. – 284 p.
113. Haykin Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Edition. Prentice Hall, 2006.- 1104 p.
114. Lipis V., Remez Yu. Safe ship control regimes in storm – M.: Transport, 1982. – 117 p.
115. Stevens S., Parsons M. Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey / Marine Technology, Vol. 39, N1, Jan 2002 – pp.29-47.
116. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. On risk assessment and decision-making while controlling the ship in adverse weather conditions / Proceedings of the 9th AGA, IAMU, California Maritime Academy, 2008. – pp. 208 – 214 pp.
117. Pipchenko O. Model of ship operation efficiency assessment in waves / Navigation: ONMA scientific journal, #17. – Odessa: Izdatinform, 2010. – pp. 146-154.
118. Nechaev Yu., Pipchenko O., Sizov V. Selection of optimal course in adverse weather conditions / Navigation: ONMA scientific journal, #16. – Odessa: Izdatinform, 2009. – pp. 105-118.
119. Жуков Д.С. Комплексне врахування небезпечних чинників для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах. *Судноводіння*, 2025. Вип. 37, с.78-91, <https://doi.org/10.31653/2306-5761.37.2025.78-91>.
120. Жуков Д.С., Алексейчук Б.М. Формування поля точності обсервації судна за декількома орієнтирами. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. Вип.1 (30). с. 69 – 79, <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.069-079>.

121. Igor Burmaka, Dmytro Zhukov. Dependence of the maximum-permissible distance of ships' convergence on the shape of the ship's safe domain. The TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 2025, Volume 19, p.265-268, <https://doi.org/10.12716/1001.19.01.31>.

122. Жуков Д.С., Алексейчук Б.М. Вибір скалярного показника для характеристики поля точності вибраних навігаційних орієнтирів. MINTT-2025, Херсон. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції. с.148-151.

123. Zhukov D. S. Research on accuracy increase of the process of avoidance of the vessels collision in congested waters. The 17th Annual General Assembly of the International Association of Maritime University, Conference paper, 2016, с. 188–193.

124. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Ship control optimization in heavy weather conditions. Proceedings of The 11th Annual General Assembly International Association of Maritime Universities, 2010, p.77-82.

125. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. Development of the Ship Model on the Basis of An Arti-Ficial Neural Network, IAMU Journal, Volume 5, No.1 August 2007, p.23-31.

Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Жуков Д.С. Комплексне врахування небезпечних чинників для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах. *Судноводіння*, 2025. Вип. 37, с.78-91, <https://doi.org/10.31653/2306-5761.37.2025.78-91>.

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

3. Igor Burmaka, Dmytro Zhukov. Dependence of the maximum-permissible distance of ships' convergence on the shape of the ship's safe domain.

The TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 2025, Volume 19, p.265-268, <https://doi.org/10.12716/1001.19.01.31> , SCOPUS.

4. Жуков Д.С., Алексейчук Б.М. Вибір скалярного показника для характеристики поля точності вибраних навігаційних орієнтирів. MINTT-2025, Херсон. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції. С.148-151.

5. Dmytro S. Zhukov, Research on accuracy increase of the process of avoidance of the vessels collision in congested waters. The 17th Annual General Assembly of the International Association of Maritime University, Conference paper, 2016, с. 188–193, SCOPUS.

6. Pipchenko A. D., Dmytro S. Zhukov. Ship control optimization in heavy weather conditions. Proceedings of The 11th Annual General Assembly International Association of Maritime Universities, 2010, p.77-82.

7. Pipchenko A. D., Zhukov D. S. On risk assessment and decision-making while controlling the ship in adverse weather conditions / Proceedings of the 9th AGA, IAMU, California Maritime Academy, 2008. – pp. 208 – 214 pp. SCOPUS.

8. A. Pipchenko, Capt. Dmytro S. Zhukov, Development of the Ship Model on the Basis of An Artificial Neural Network, IAMU Journal, Volume 5, No.1 August 2007, p.23-31.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні результати і положення роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях:

- XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2025» (Херсон, 28–30 травня 2025 р.);

- 16-й Міжнародній науковій конференції «Морська навігація та безпека морських перевезень (TransNav-2025)» (м. Гдиня, Республіка Польща, 11–13 червня 2025 року);

- щорічних Міжнародних конференціях Міжнародної асоціації морських університетів AGA IAMU (2008, 2010, 2016 pp.).

Акти упровадження результатів дисертації



ТОВ «ТСБ Україна»
вул. Лєскова, 3А,
Миколаїв, 54020, Україна
тел.: +38 (0512) 50 71 16
факс: +38 (0512) 50 71 17
e-mail: info@tsbu.com.ua

Від
06.05.2025р. № 249/1

Начальнику

від ТОВ «ТСБ Україна»
54020, м. Миколаїв,
вул. Лєскова, буд.3-А

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчується, що у компанії ТОВ «ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ УКРАЇНА» (код ЄДРПОУ 19285560), отримав впровадження метод комплексного урахування впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння, який розроблено у дисертаційній роботі Жукова Дмитра Сергійовича на тему „Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння”.

Метод використовується під час перепідготовки судноводіїв (фахівців) компанії (компаній).

З повагою,
Заступник генерального директора



Павло Устенко

ТОВ «ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ УКРАЇНА»

Регістраційний номер 19285560



СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ
СЕРТИФІКОВАНА НА
ВІДПОВІДНІСТЬ ДСТУ ISO 9001:2015
Регістром судноплавства України



Україна, 54020, Миколаївська обл., м. Миколаїв, вул. Гонгадзе Георгія, будинок 5/1.
код ЄДРПОУ 37278701; ППН 372787014040; свідоцтво платника ПДВ № 200008131;
р/р UA893005280000026009455035593 в АТ «ОТП Банк», м. Київ, МФО 300528;
тел. +38 067-510-19-66; тел. +38 066-001-55-74
E-mail: Energy@a-technologies.com.ua; Web-site: www.a-technologies.com.ua

06.05.2025р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчується, що у компанії Товариство з обмеженою відповідальністю «А-Технології» отримали впровадження такі результати дисертаційної роботи Жукова Дмитра Сергійовича „Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння”:

- метод комплексного урахування впливу суттєвих ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння;
- спосіб формування поля точності, створеного декількома орієнтирами.

Директор ТОВ «А-Технології»



Анатолій ХОЛОСТЕНКО



СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІ
СЕРТИФІКОВАНА НА
ВІДПОВІДНІСТЬ ДСТУ ISO 9001
Регістр судноводіння

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Одеська морська академія»
д.т.н., професор

Вадим ЗАХАРЧЕНКО

20 26 р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувача Жукова Дмитра Сергійовича
на тему «Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку
судноводіння» в звіт науково-дослідної роботи № ДР 0123U101463
«Удосконалення методів управління та експлуатації суден»

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету к.т.н., професор Савчук В.Д., директор навчально-наукового інституту навігації д.т.н., професор, к.д.п. Ворохобін І.І. та завідувач кафедри управління судном д.т.н., професор Бурмака І.О. склали цей акт у тому, що результати дисертації здобувача Жукова Д.С. на тему «Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку судноводіння» впроваджені в звіті науково-дослідної роботи «Удосконалення методів управління та експлуатації суден» (№ ДР 0123U101463, Розділ - Аналіз поля точності, яке створюється декількома орієнтирами).

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор



Віктор САВЧУК

Директор навчально-наукового
інституту навігації,
д.т.н., професор



Ігор ВОРОХОБІН

Завідувач кафедри
управління судном,
д.т.н., професор



Ігор БУРМАКА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного університету
«Одеська морська академія»,
д.ю.н., професор



Олександр ШЕМЯКІН

05 2025 р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувача Жукова Дмитра Сергійовича
на тему «Мінімізація впливу ризиків навігаційних аварій на безпеку
судноводіння» в освітній процес

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М., директор навчально-наукового інституту навігації д.т.н., професор, к.д.п. Ворохобін І.І. та завідувач кафедри управління судном д.т.н., професор Бурмака І.О. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Жукова Д.С. на здобуття ступеню «кандидата наук» впроваджені в освітній процес рівня підготовки бакалавр, по навчальній дисципліні «Попередження зіткнення суден та використання радіолокаційних станцій і засобів автоматизованої радіолокаційної прокладки».

Начальник навчального
відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Директор навчально-наукового
інституту навігації,
д.т.н., професор

Ігор ВОРОХОБІН

Завідувач кафедри
управління судном,
д.т.н., професор

Ігор БУРМАКА